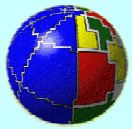


Tecniche radio per investigare la ionosfera terrestre.

- Tra le tecniche più affermate per eseguire misure occasionali o sistematiche, locali o remote, in ambito geofisico vi sono quelle che utilizzano le onde elettromagnetiche.
- Tali tecniche sfruttano alcune modificazioni delle onde radio quando esse interagiscono con il mezzo.
- Le tecniche radio (attive e passive) sono tra le più semplici e utili. Esse coinvolgono quasi tutti i campi di frequenza delle onde radio.
- La ionosfera non fa eccezione: la tecnica più usata è quella di inviare onde radio nella ionosfera ed osservare il segnale d'eco. Esso contiene informazioni relative agli strati che ha attraversato, in cui si è parzialmente riflesso, rifratto o parzialmente assorbito.
- Anche segnali provenienti dai satelliti (GNSS, GPS) o da emittenti terrestri (VLF) che non sfruttano esplicitamente la tecnica radar possono contenere informazioni utili su alcune proprietà del mezzo attraversato.



- Groundscatter ionospheric radar
- Ionosonde su satellite
- **Sondaggio verticale**
- Sondaggio obliquo
- Incoherent scatter radar

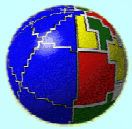
Active, radar

- **Riometro**
- Radio beacon
- **GPS per scintillazioni**

Passive, sorgente extraterrestre

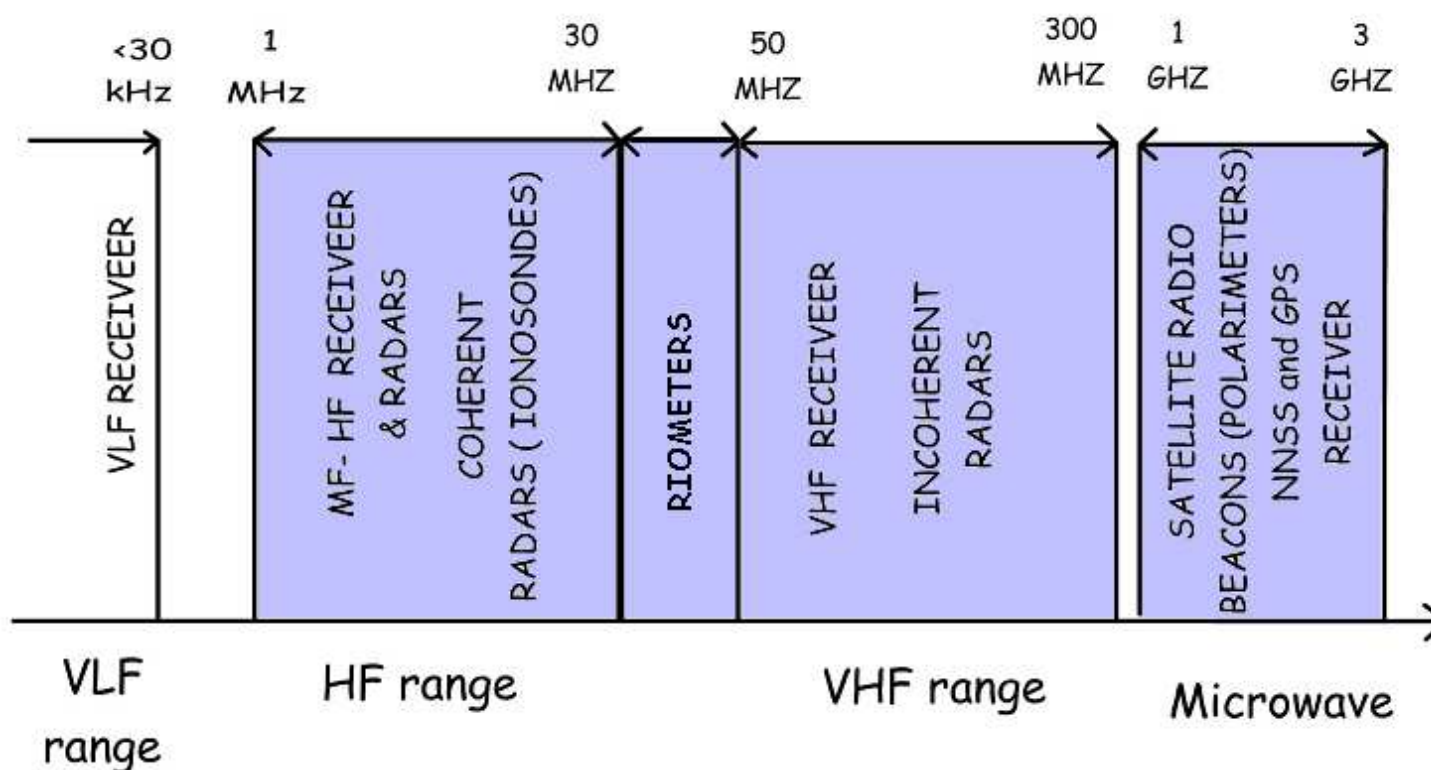
- Modifica della ionosfera con onde di alta potenza
- Riscaldamento della ionosfera

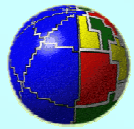
Perturbazione artificiale



ELF	SLF	ULF	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
3 Hz	30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz
30 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	3 MHz	30 MHz	300 MHz	3 GHz	30 GHz	300 GHz

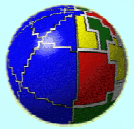
Campi di frequenza impiegati nelle misure ionosferiche





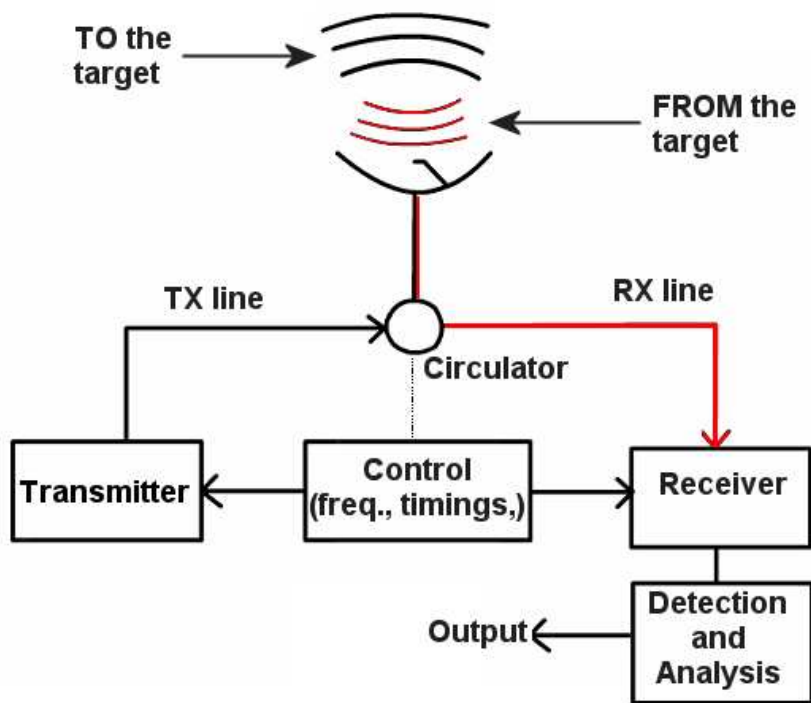
INGV

Teoria del RADAR

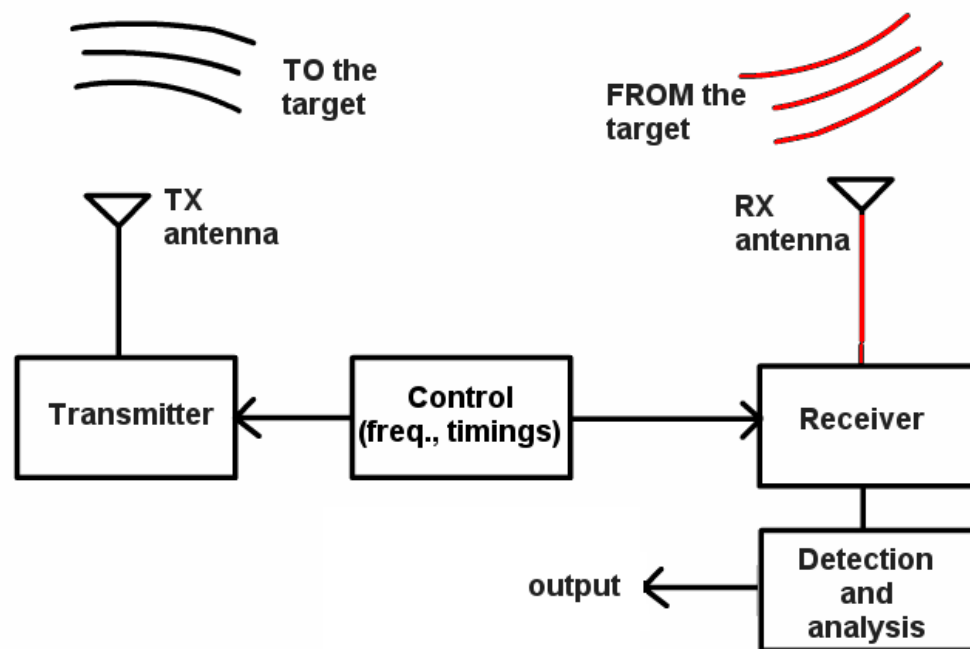


RADIO Detection AND Ranging

Attraverso impulsi di onde e.m. di opportuna frequenza ed energia individua bersagli e ne rivela la distanza dal sistema stesso.

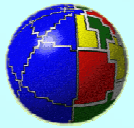


monostatico: una antenna (circolatore per distribuire l'energia



bistatico: due antenne

Qualunque sia il tipo si noti come l'apparato di controllo "informi" il ricevitore sulla frequenza usata istante per istante dal trasmettitore.



$$P_r = \frac{(\lambda G_d)^2 \sigma P_{rad}}{(4\pi)^3 r^4}$$

Parametro	Definizione	Unità
P_r	Potenza al ricevitore	W
λ	Lunghezza d'onda	m
G_d	Guadagno di antenna direttivo (densità di potenza irradiato in una direzione)	
σ	Radar cross section (descrive la capacità del bersaglio di riflettere l'energia)	m ²
P_{rad}	Potenza emessa (potenza dissipata sull'impedenza caratteristica dell'antenna)	W
r	Distanza tra radar e bersaglio	m

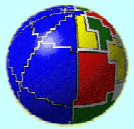
Radar cross section è definita come l'area che intercetta l'onda incidente e diffonde l'energia nello spazio isotropicamente:

$$\sigma = 4 \pi r^2 \frac{P_s}{P_i}$$

Dove P_i è la densità di potenza incidente misurata sul bersaglio,

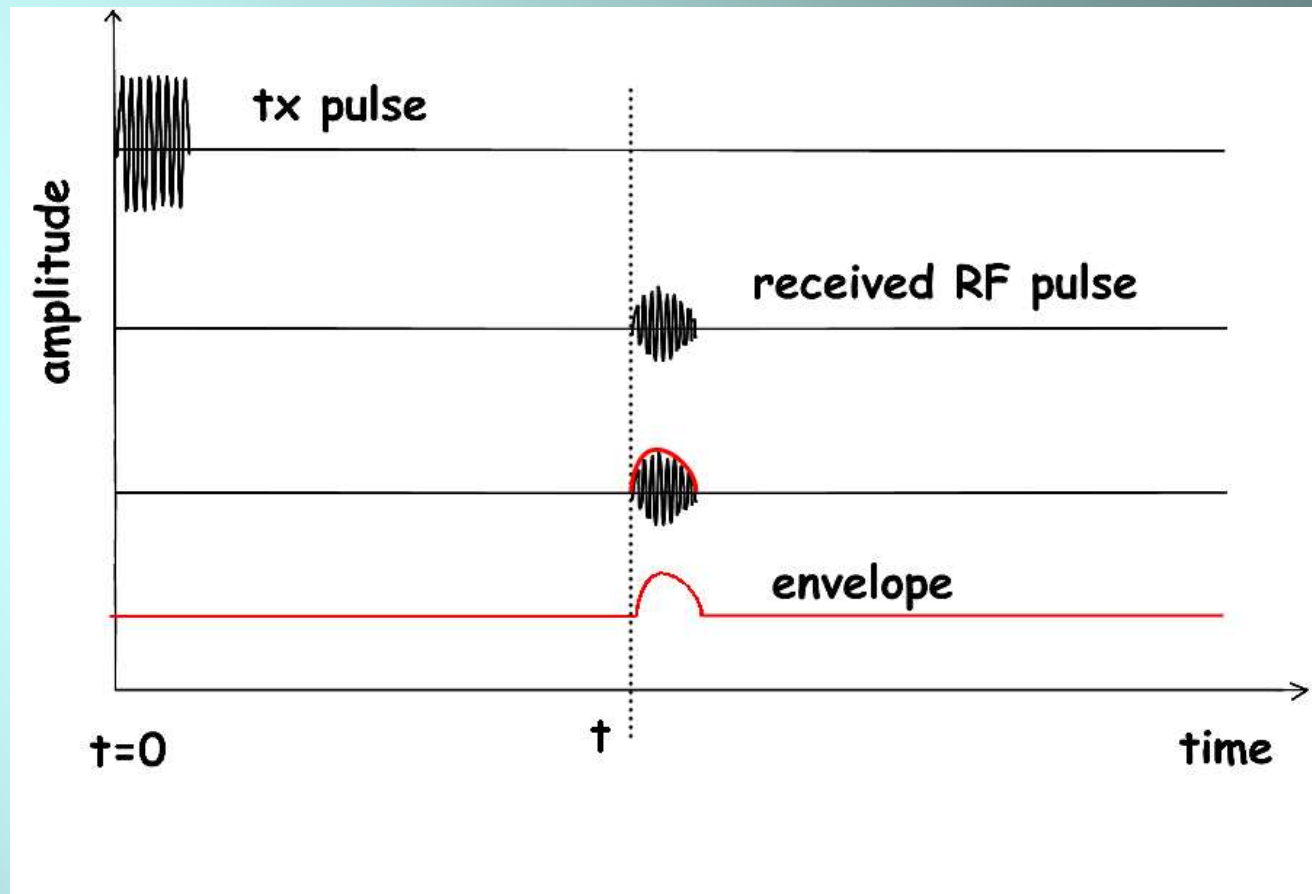
P_s è la densità di potenza diffusa vista a distanza r dal bersaglio.

Ogni target avrà la sua radar cross section.

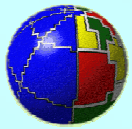


- Impulsi di opportuna ampiezza e durata sono emessi in direzione del bersaglio mediante una antenna trasmittente (TX).
- Dopo un tempo “t” il ricevitore riceve un possibile eco (RX).
- La distanza è valutata misurando il tempo di ritardo tra l’impulso emesso e quello ricevuto.

$$d = \frac{v \cdot t}{2}$$

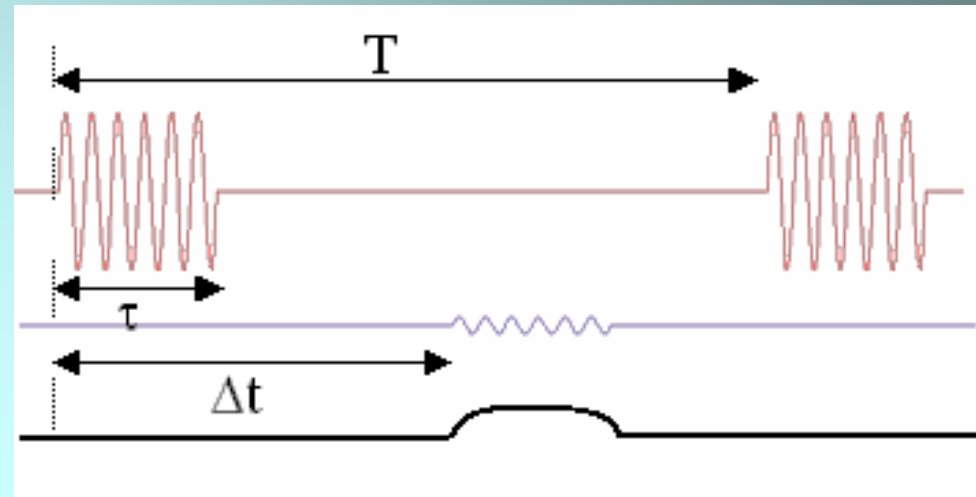


- I primi modelli di radar funzionavano sul principio dell'inviluppo.
- Il ricevitore, sintonizzato sulla frequenza giusta, segue i massimi del segnale ricevuto, generando un segnale elettrico che “inviluppa” l'eco ricevuto.



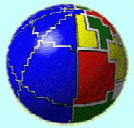
Inviluppo: principio base

- Impulsi di durata τ che si ripetono ad intervalli di T vengono emessi dall'antenna TX.
- L'energia riflessa attenuata viene ricevuta dalla antenna RX dopo un tempo Δt
- Il sistema di ricezione genera un impulso di ampiezza opportuna di durata pari a $\approx \tau$ (inviluppo)
- Distanza del bersaglio
- Distanza minima di un bersaglio

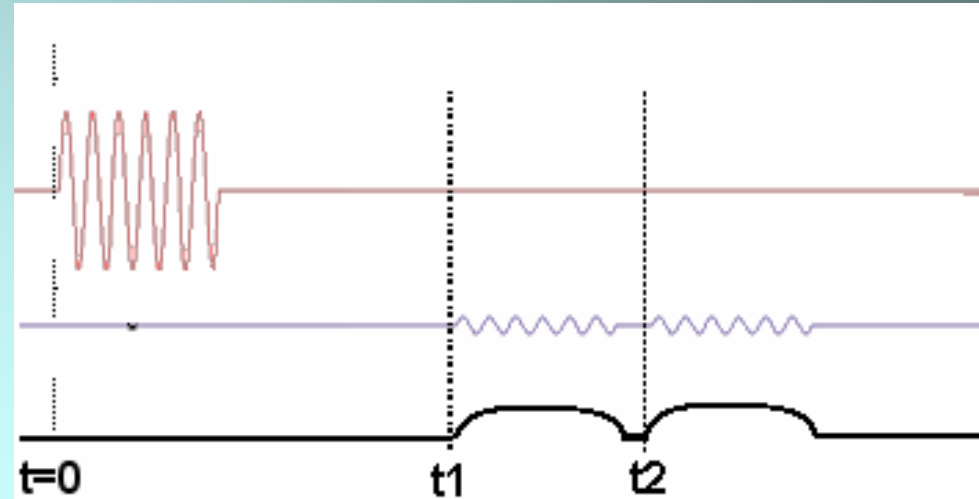


$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

$$d_{\min} = \frac{c \cdot \tau}{2}$$



Per valutare la risoluzione spaziale di un radar ricordiamo che affinché 2 echi siano distinguibili occorre che $t_2 - t_1 > \tau$



•Risoluzione

$$\delta d = \frac{c \cdot \tau}{2}$$

•Massima distanza bersaglio.....

$$d_{\max} = \frac{c \cdot T}{2}$$

•Energia emessa da un amplificatore di potenza P.....

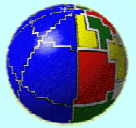
$$E = P \cdot \tau$$

Vantaggi

- Semplicità del sistema TX
- Semplicità del sistema ricevente
- Possibilità di un ricevitore analogico

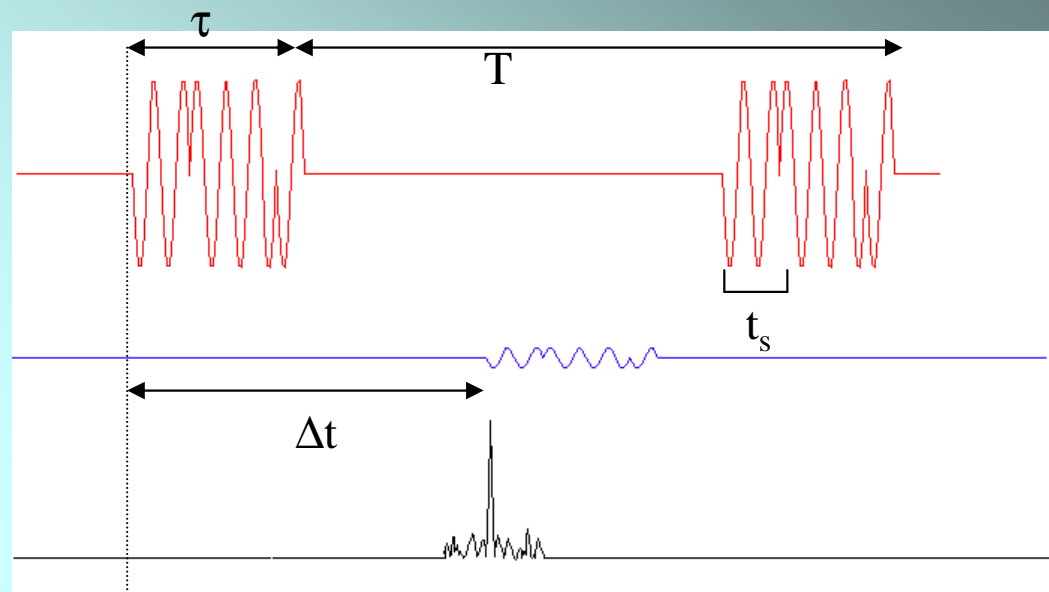
Svantaggi

- Necessità di un compromesso per τ
- Riduzione della risoluzione
- Impiego di grandi potenze per un buon S/N

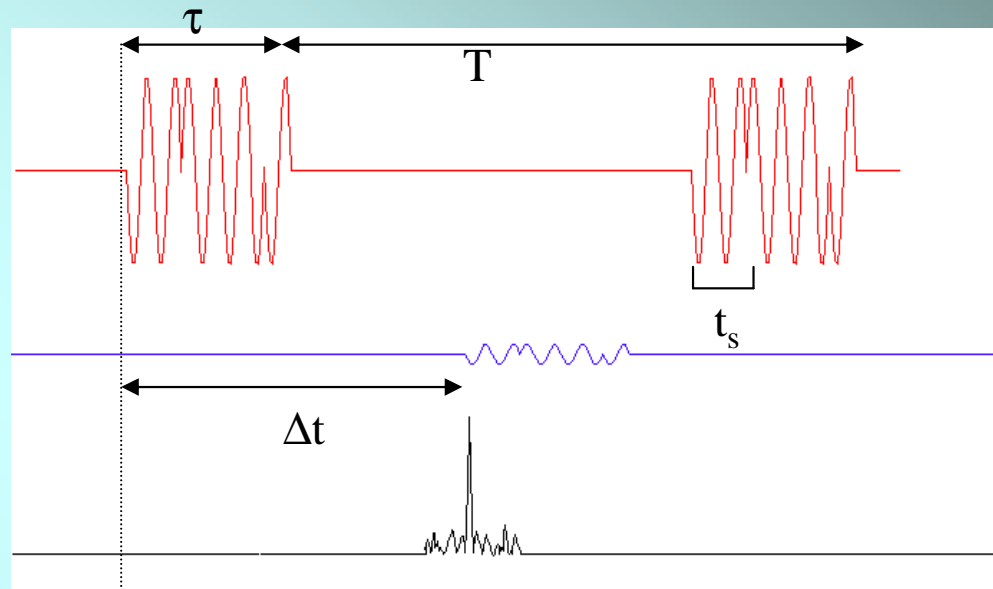
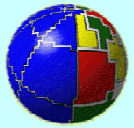


Compressione di impulsi: principio base

- Variando ripetutamente la fase all'interno di un impulso τ , la risoluzione nel processo di ricezione è quella che compete ad un impulso minore t_s (da qui "compressione di impulso").
- t_s è il minimo intervallo di tempo in cui la fase è costante (sub impulso).



- La sequenza dei cambiamenti di fase è detto CODICE .
- Qui il rivelatore non è completamente elettronico; c'è un processo matematico di correlazione che "cerca" il codice nell'eco ricevuto.
- Il processo di ricezione (matematico) genera un massimo corrispondente alla quota da cui proviene l'eco del codice.
- E' un processo robusto, piuttosto immune al rumore del segnale.



•Distanza del bersaglio

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

•Distanza minima di due bersagli (risoluzione spaziale)

$$\delta d = \frac{c \cdot t_s}{2}$$

•Energia da un amplificatore di potenza P.....

$$E = P \cdot \tau$$

•Massima distanza di un bersaglio.....

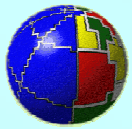
$$d_{\max} = \frac{c \cdot T}{2}$$

Vantaggi

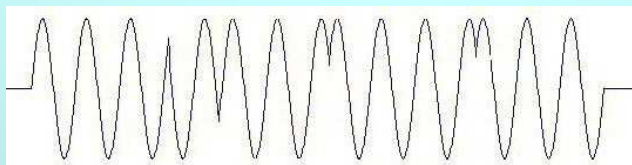
- Risoluzione dipende solo da t_s
- Maggiore ampiezza di τ
- Minore potenza per avere stessa energia
- Maggiore S/N all'uscita del ricevitore

Svantaggi

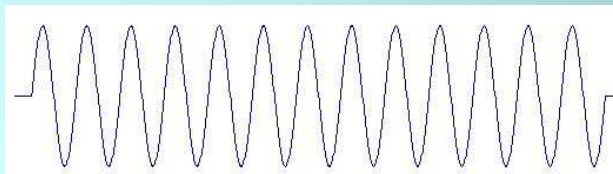
- Maggiore complessità nella generazione dell'impulso da trasmettere
- Maggiore complessità nell'analisi del segnale (sistema di calcolo, correlazione)



Perchè la compressione di impulsi funziona



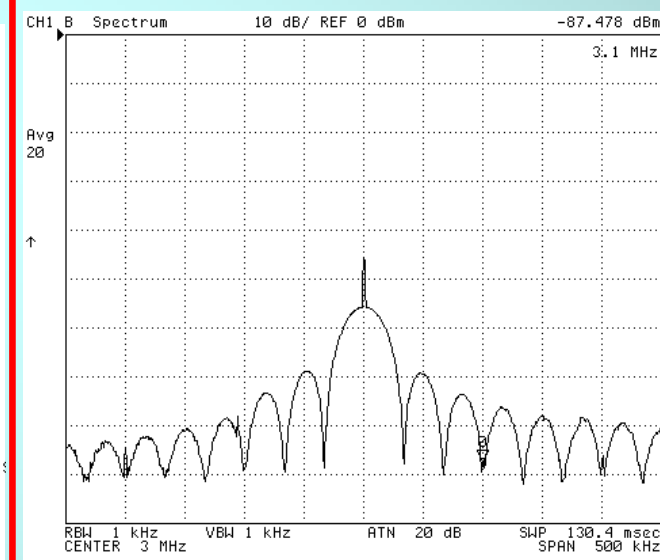
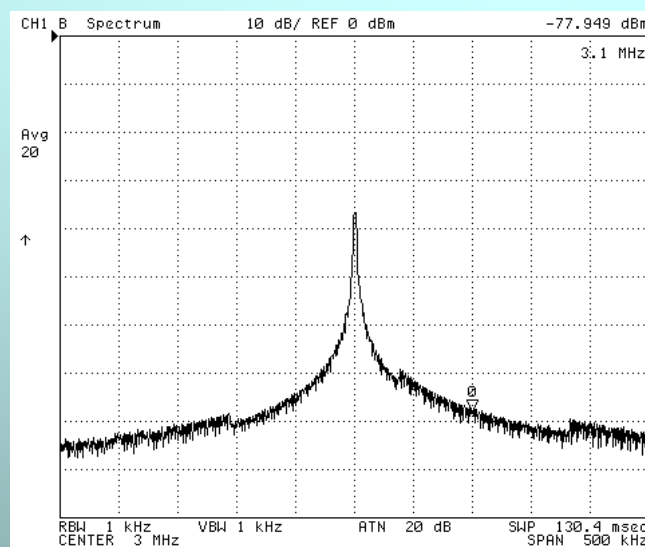
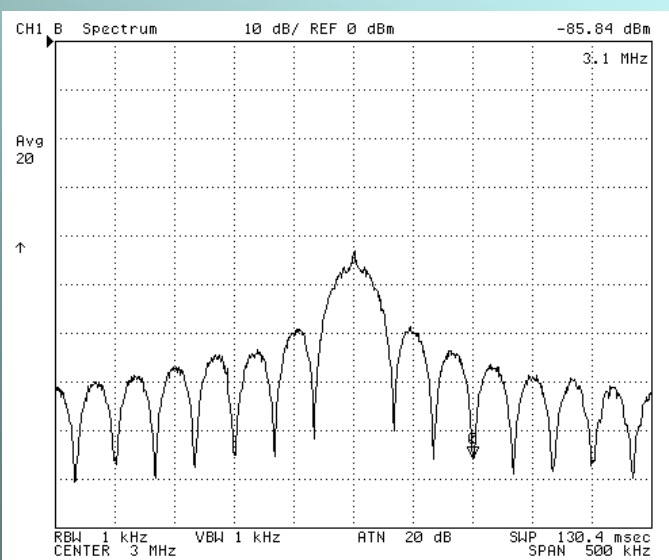
Lunghezza impulso $480\mu\text{s}$
Freq. di ripetizione 60Hz
CODICE
Banda $\sim 66\text{kHz}$

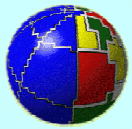


Lunghezza impulso $480\mu\text{s}$
Freq. di ripetizione 60Hz
NO CODICE
Banda $\sim 4\text{kHz}$



Lunghezza impulso $30\mu\text{s}$
Freq. di ripetizione 60Hz
NO CODICE
Banda $\sim 66\text{kHz}$





INGV

Legge della secante

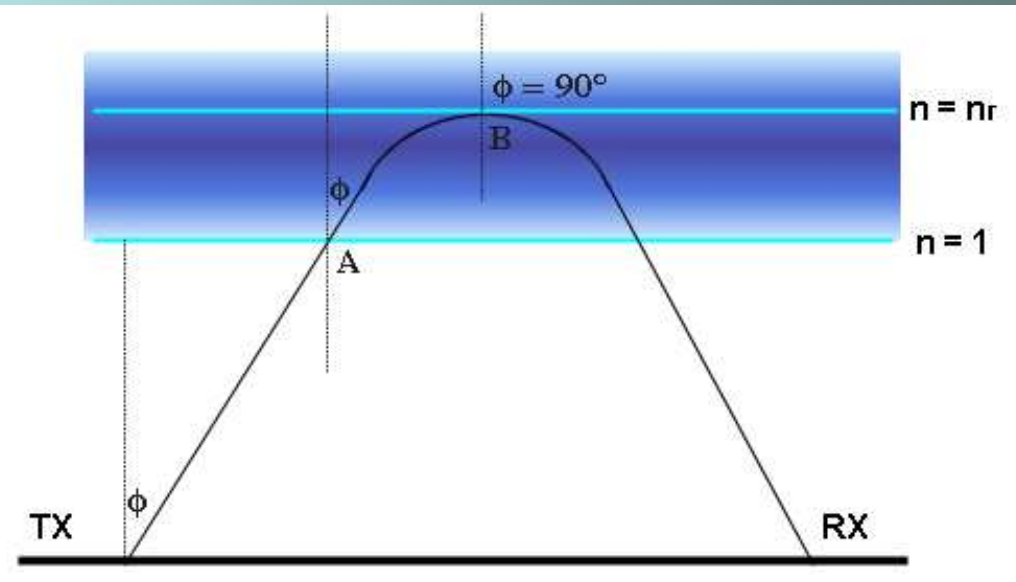
$$f_{obl} = f_N \sec \phi$$

dove

f_{obl} : frequenza emessa obliquamente verso la ionosfera;

ϕ angolo tra la direzione di emissione e la normale alla ionosfera;

f_N frequenza di plasma nel punto di riflessione (legata ad N)



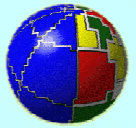
dalla legge di Snell

$$n \cdot \sin \phi = \text{costante}$$

deriva $1 \cdot \sin \phi = n_r \cdot \sin 90^\circ$ cioè $\sin \phi = n_r$

Quadrando, passando al coseno e ricordando che $n_r^2 = 1 - \frac{f_N^2}{f_{obl}^2}$

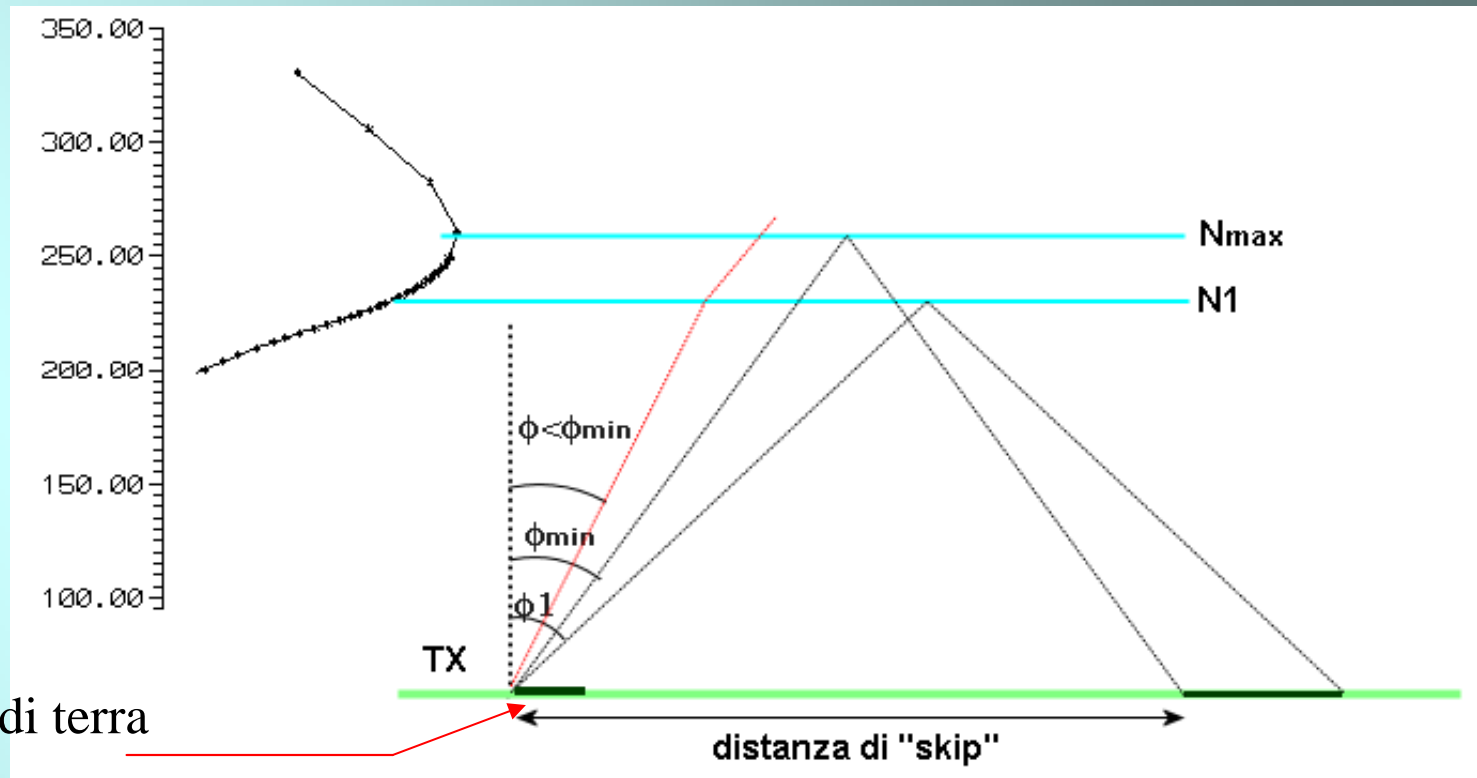
$$\sqrt{1 - \frac{f_N^2}{f_{obl}^2}} = \sqrt{1 - \cos^2 \phi} \quad f_{obl} = \frac{f_N}{\cos \phi} \quad \text{e quindi} \quad f_{obl} = f_N \sec \phi$$



INGV

Distanza di skip

onda di terra



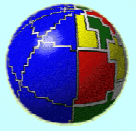
- Fissiamo f_{obl} calcoliamo l'angolo corrispondente a f_{N1} nel soddisfare la legge della secante:

$$\sec \phi_1 = \frac{f_{obl}}{f_{N1}}$$

- Se l'angolo diminuisce a parità di frequenza emessa la legge della secante impone che f_N cresca, fino al massimo

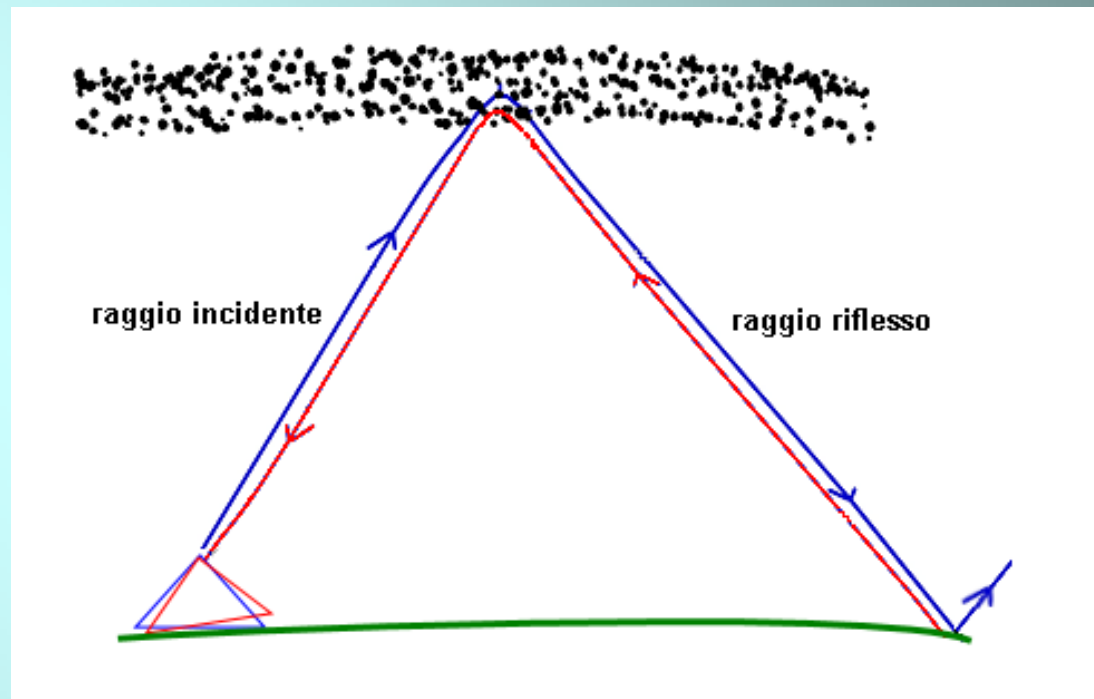
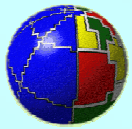
$$\sec \phi_{min} = \frac{f_{obl}}{f_{Nmax}}$$

- L'angolo trovato sarà quindi quello minimo (ad angoli inferiori l'onda non si riflette).
- Non è possibile trasmettere all'interno della zona di skip. (in parte con onda di terra).
- Ad angoli maggiori di quello minimo la riflessione è possibile fino al limite della tangenza al terreno.

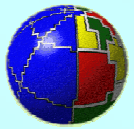


INGV

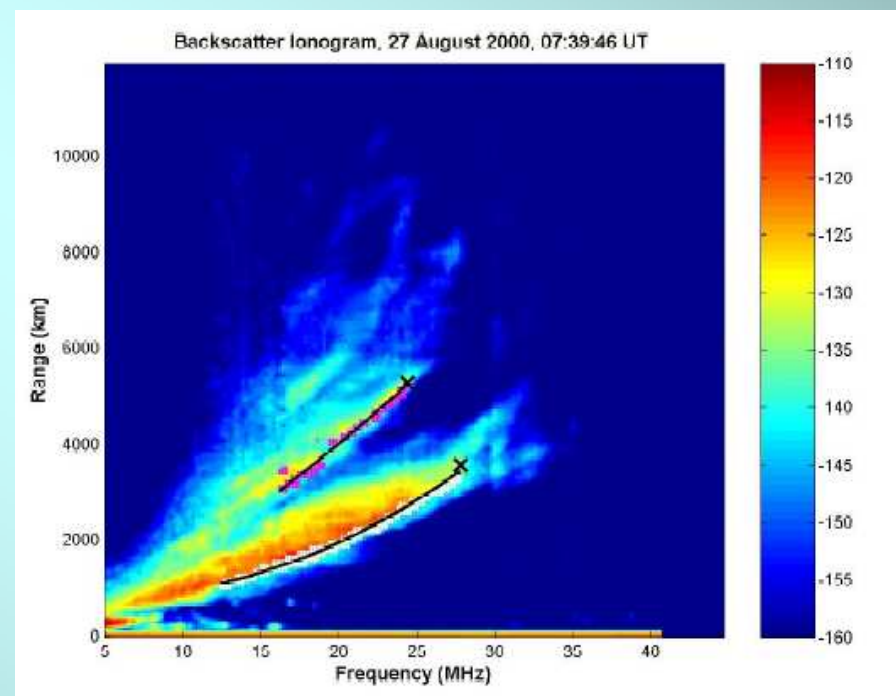
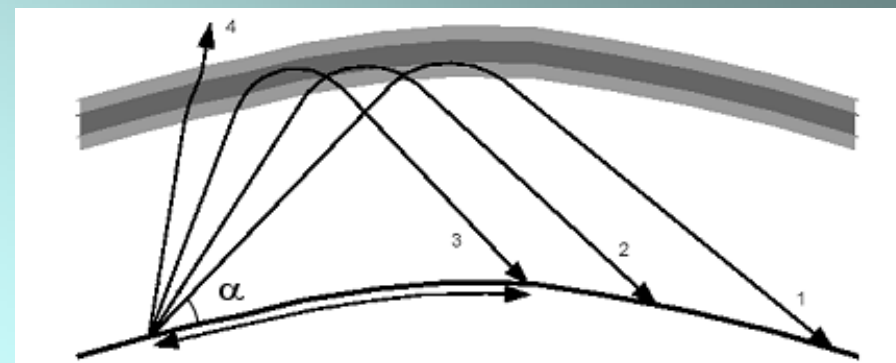
Ground scattering radar



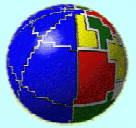
- Si emette energia tramite un'antenna obliquamente verso la ionosfera; tale energia dopo una riflessione giunge a terra ed è retro diffusa dal terreno verso il punto di trasmissione.
- Tale fenomeno fu osservato fin dagli anni '30 anche se al momento una spiegazione del fenomeno non c'era.
- Si comprendeva che qualcosa di riflettente ci doveva essere, ma si pensava piuttosto ad altissime stratificazioni della atmosfera (compatibili con ritardi tanto lunghi).
- Nel dopo guerra furono fatti ulteriori sforzi nella comprensione del fenomeno e negli anni '50 si arrivò a comprendere che la maggior parte della riflessione avveniva al margine della zona di skip.



- Lo strumento usato è un radar ionosferico con una potenza trasmessa di diverse centinaia di kW e frequenze nel campo HF.
- L'antenna è a larga banda, molto direzionale, usata a bassi angoli di elevazione.
- Se la radiazione è emessa per alti valori di α attraverserà la ionosfera (raggio 4), mentre per angoli più bassi verrà riflessa e deviata verso terra a diverse distanze (raggio 3, 2, 1). Qui una piccolissima parte dell'energia verrà riflessa e riper correrà lo stesso cammino all'indietro.
- Consideriamo uno ionogramma: si osserva che fissando la frequenza i tempi di ritardo si distribuiscono da un minimo ad un massimo, perché l'antenna consente diversi angoli di radiazione, mentre al variare della frequenza il minimo ritardo cresce perché aumenta la distanza di skip (legge della secante).



- Una volta compreso il fenomeno, la tecnica fu messa a punto tanto da essere usata per misurare vari parametri della ionosfera: irregolarità dello strato E sporadico e della regione F.
- A questo punto ci si potrebbe domandare se gli effetti osservati possano essere dovuti a disomogeneità del suolo piuttosto che della ionosfera. Studi teorici e sperimentali hanno dimostrato che date le caratteristiche dello strumento (lunghezza dell'impulso, lobi di radiazione dell'antenna) gli effetti di focalizzazione o defocalizzazione della ionosfera sono più forti degli effetti dovuti alle caratteristiche del terreno.



Misura

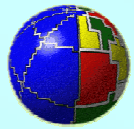
- Irregolarità dello strato E sporadico e della regione F

Vantaggi

- Usando un sistema di antenne a fascio stretto si possono localizzare meglio le irregolarità.

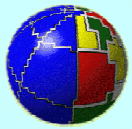
Svantaggi

- Costi elevati e necessità di grandi spazi per costituire gli array di antenne necessari per un'alta direzionalità.
- Potenze enormi vista l'esigua quantità di energia che ritorna al ricevitore.



INGV

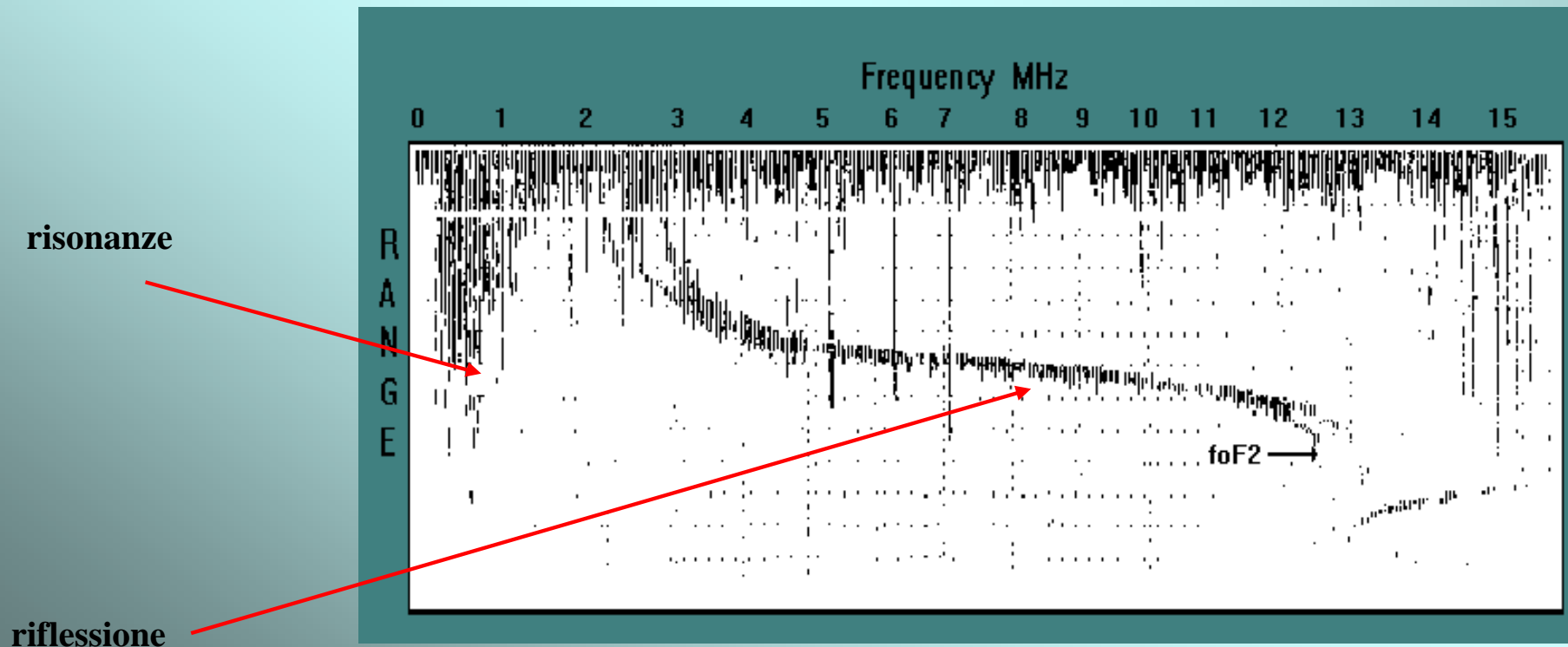
Ionosonda su satellite

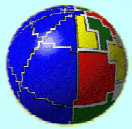


Un apparato di sondaggio da satellite è un radar HF posizionato al di sopra della ionosfera a bordo di satelliti polari per ottenere una copertura globale. Il sistema effettua una scansione in frequenza da 0.3 a 15 MHz in qualche decina di secondi, ricevendo il segnale retrodiffuso dalla regione F2 della ionosfera. (satellite viaggia a 7km/s ad una quota di 800km).

La minima frequenza alla quale il segnale passa attraverso la ionosfera stessa è chiamata frequenza critica, foF2.

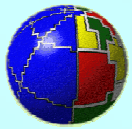
Durante la scansione gli elettroni sono stimolati anche a frequenze basse, causando risonanze (nel sondaggio verticale da terra lo strato D impedisce l'uso di frequenze inferiori a 1MHz per vedere tali risonanze). Il risultato di tale scansione è lo ionogramma che si presenta come in figura (notate la forma in confronto al sondaggio classico da terra).





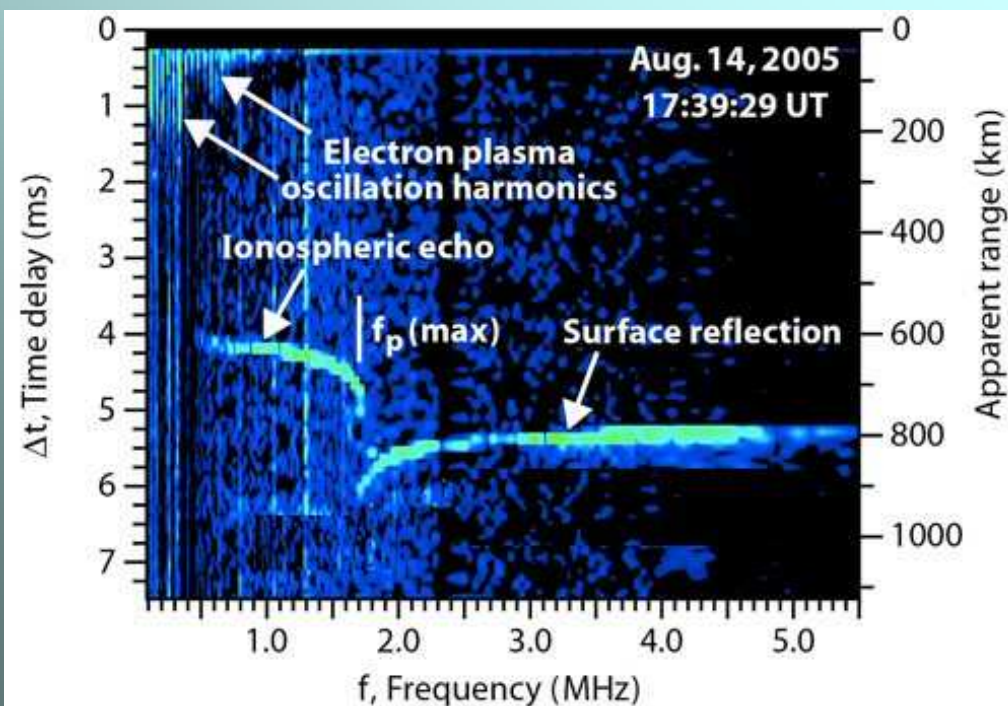
- La necessità nasce dal fatto che le mappe di f_oF_2 misurato a disposizione sono poche.
- Soprattutto le zone oceaniche e quelle più povere della terra sono coperte molto scarsamente. Qui i valori sono estrapolati con tutti i limiti di tale operazione.
- Inoltre anche lì dove esistono ionosonde a terra, i sondaggi sono fatti al di sotto degli strati ionosferici e non si hanno misure del profilo di densità delle zone superiori della ionosfera.
- Questo è il motivo per cui fin dagli anni '60 sono stati lanciati satelliti con ionosonde a bordo.

Alouette I	1962	USA-Canada	I gen	Non avevano capacità di memoria on board e dialogavano con un vasto network di stazioni terra inviando ad esse i risultati direttamente. Ionosonde analogiche e poco flessibili. Antenne di grandi dimensioni (fino a 70m) e payload considerevoli.
Explorer XX	1964	USA	I gen	
Alouette II	1965	USA-Canada	I gen	
ISIS I	1969	USA-Canada	II gen	Poca memoria on board e limitata capacità di controllo. Scarsa capacità di adattamento ai cambi di programmi di un satellite.
ISIS II	1971	USA-Canada	II gen	
ISS II	1978	Giappone	II gen	
IK 19	1979	Russia	II gen	Dotate di computer a bordo e possibilità di memorizzare fino a 16 ore di ionogrammi
Cosmos 1809	1986	Russia	II gen	

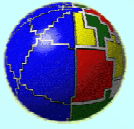


Le ionosonde da satellite di terza generazione hanno le seguenti caratteristiche:

- digitali, altamente flessibili (possono servire a varie misure);
- dotate di grande quantità di memoria ed analisi del segnale on line;
- antenne di soli 15 m di lunghezza adattabili automaticamente alla frequenza;
- potenza media inferiore ai 20W e 50kg di peso totali del satellite;
- presenza di strumenti per la misura della posizione in modo da georeferenziare i dati.



Ionogramma preso dallo strumento MARSIS (Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding) strumento dell'ESA, sovvenzionato dalla NASA e dall'ASI.

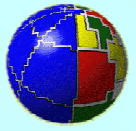


Vantaggi

- Non c'è assorbimento da strato D.
- Poco rumore ambientale.
- Informazioni nella parte superiore dello strato F2.
- Disponibilità di dati anche in zone irraggiungibili da terra per arricchire i data bases e possibilità di conferma con profili modellati, lì dove stazioni a terra esistono.
- Si possono ottenere informazioni sulle ionosfere di altri pianeti.

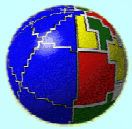
Svantaggi

- Costo dello sviluppo e lancio di un satellite.
- Necessità di limitare pesi e consumi.
- Almeno agli albori di questa tecnica era necessaria un continuo scambio di dati con una rete a terra.



INGV

Radar a scattering incoerente



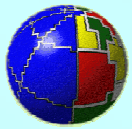
- Consiste nell'emettere nel plasma ionosferico energia elettromagnetica sotto forma di impulsi, considerando il plasma come un insieme di ioni ed elettroni che diffonderanno il segnale con ampiezze e fasi non correlate tra loro.
- La previsione teorica che onde radio potessero essere diffuse da cariche individuali risale al lavoro di J.J. Thomson (1906). Quest'ultimo predisse la radar cross section dell'elettrone e Fabry (1928) suggerì l'applicazione della tecnica di scattering alla ionosfera terrestre.
- Le frequenze utilizzate devono essere ben al di sopra delle frequenze critiche degli strati ionosferici per penetrare il plasma (non sono interessato ad un eco coerente); da qui l'impiego di frequenze VHF e UHF.
- In più la "radar cross section" di particelle come gli elettroni è molto piccola, così come la potenza retrodiffusa che dipende da essa:

$$P_r = \frac{(\lambda G_d)^2 \sigma P_{rad}}{(4\pi)^3 r^4}$$

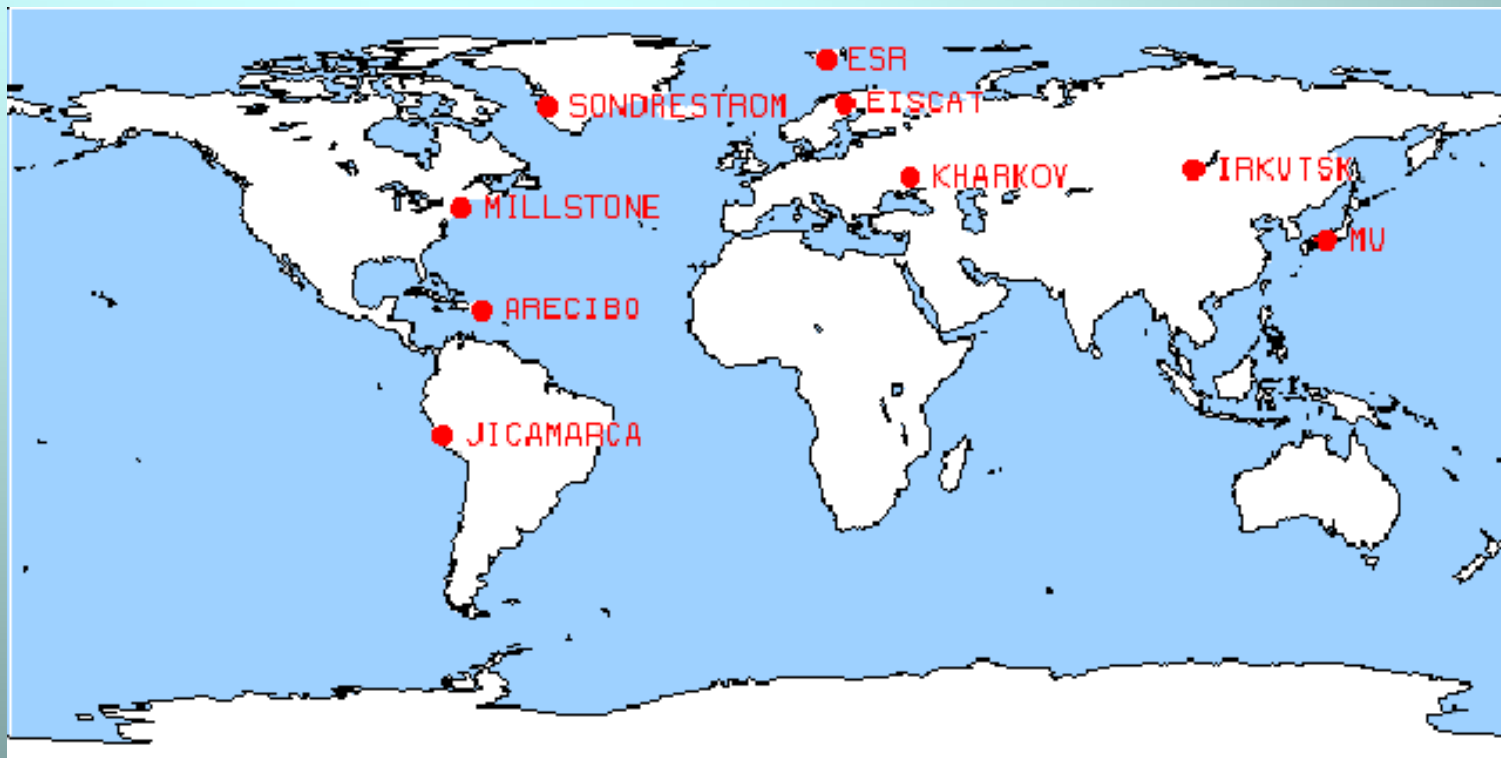
- Per questo le antenne devono avere:

Grande direttività: questo si ottiene a volte con l'uso di array con il vantaggio ulteriore di poter identificare la direzione di arrivo dell'energia.

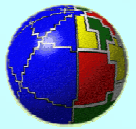
Alto guadagno in trasmissione e ricezione (da qui deriva la necessità di enormi dimensioni).



- Introdotto negli anni 60 è di fatto la tecnica da terra per eccellenza, essendo quella che dà il maggior numero di informazioni sulla ionosfera terrestre; di contro è anche la tecnica più costosa.
- Ad oggi le più importanti installazioni sono 9, distribuite come in figura



- EISCAT, ESR e SONDERSTROM hanno la caratteristica di vedere ionosfera in zone aurorali dando informazioni utili in presenza di tempeste magnetiche e ionosferiche.

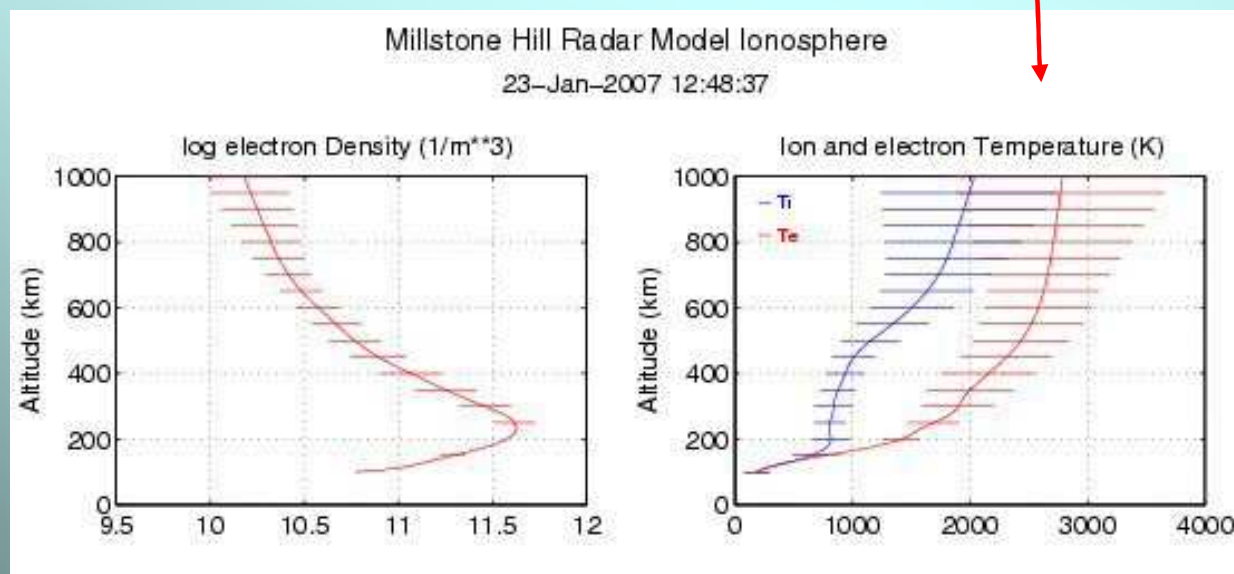


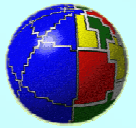
INGV

Dal momento che elettroni e ioni sono animati da agitazione termica la misura diretta è sostanzialmente una misura di shift Doppler, con informazione della direzione (array).

Da questa misura si possono dedurre una gran quantità di altre grandezze, tra cui:

- profilo di N al variare dell'altezza, reale, senza bisogno di inversione,
- distribuzione di velocità degli ioni e degli elettroni in funzione dell'altezza,
- temperatura elettronica e ionica a varie quote.
- Altre grandezze ricavate a partire da modelli.





INGV

Jicamarca:

Sito: Perù 20km da Lima (emisfero sud)
Radar: monostatico impulsato
Frequenza: 50MHz
Potenza: 5-6MW di picco
Antenna: $A=90000 \text{ m}^2$ (9000 dipoli)



Arecibo:

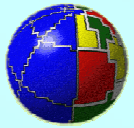
Sito: Puerto Rico
Radar: monostatico impulsato
Frequenza: 430MHz
Potenza: 2 MW di picco
Antenna: riflettore sferico da 300m diametro



EISCAT (europeo):

TX a Tromsø, ricevitori in vari posti
Radar: multistatico impulsato
Frequenze: 222.4MHz 5MW
933MHz 1.5MW
Vicinanza a regioni polari





INGV

Millstone Hill:

Sito: Westford, Massachussets

Antenna: parabola fissa allo zenith

Diametro 68 m

ampiezza fascio 0.6°

parabola orientabile

Diametro 46 m

ampiezza fascio 1.2°

TX: frequenza 440MHz

potenza 5 MW di picco



MU:

Sito: Shigaraki, Shiga, Japan

Radar: monostatico impulsato

Antenna: array di 475 yagi su un diametro di 103m

ampiezza fascio 3.6°

TX 475 amplificatori

potenza di picco 1 MW

frequenza 46.5MHz

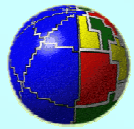


Vantaggi

- Consente la più ampia gamma di misure ionosferiche

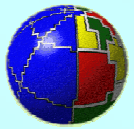
Svantaggi

- Costi elevati e necessità di grandi spazi per costituire gli array di antenne necessari per un'alta direzionalità.
- Potenze enormi vista l'esigua quantità di energia che ritorna al ricevitore.

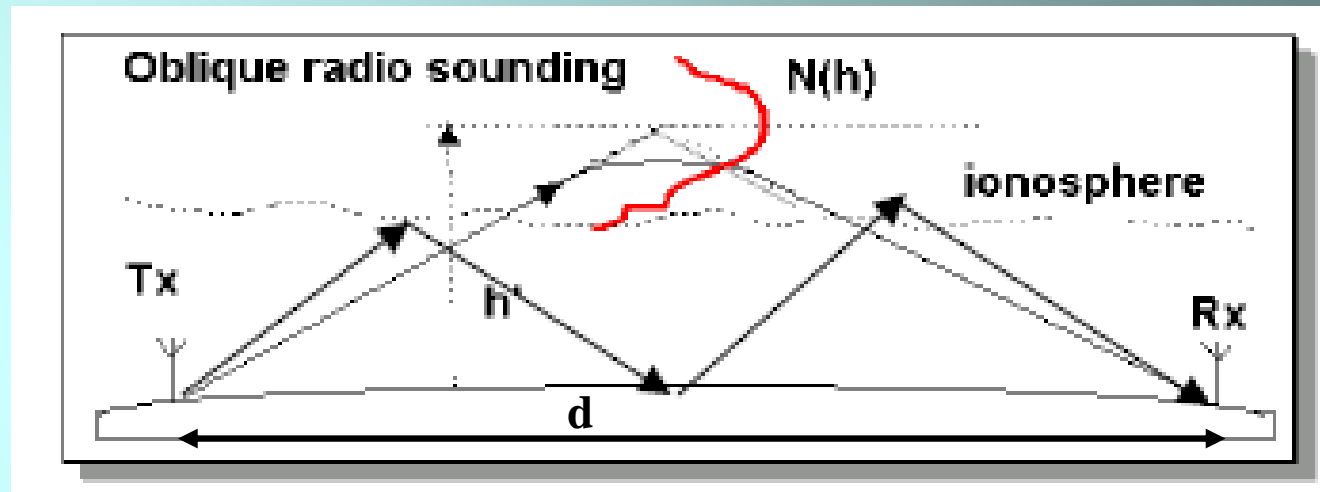


INGV

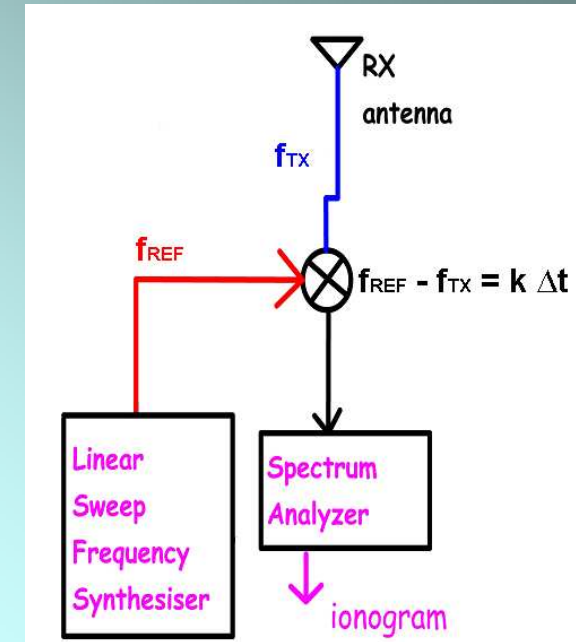
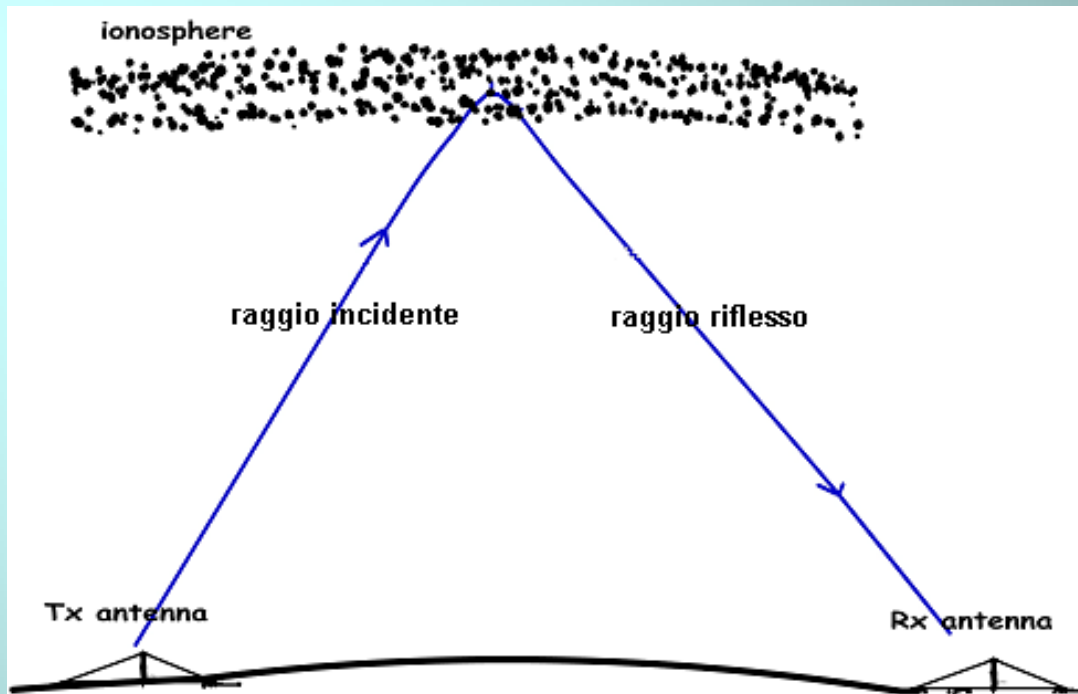
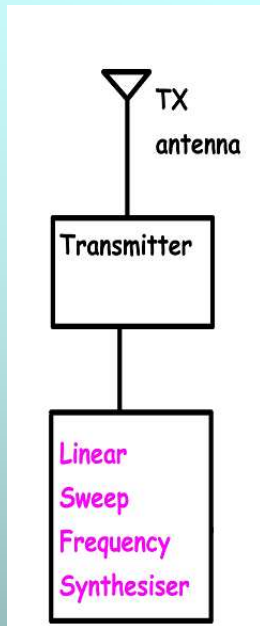
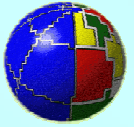
Sondaggio obliquo



Nel sondaggio obliquo un'onda radio a frequenza crescente viene trasmessa da un trasmettitore TX e dopo **una** o **più** riflessioni ionosferiche (a volte anche sul terreno) viene ricevuto da un apparato ricevente RX posto a distanza **d** dal TX.



- Quello che si misura è il ritardo con cui ricevo l'onda trasmessa, ritardo che dipende dalla distanza **d** tra TX e RX sulla superficie terrestre e dalla altezza di riflessione nella ionosfera.
- Gli apparati TX e RX si basano sulla tecnica chirp, che è una forma di modulazione di frequenza. In particolare la frequenza trasmessa varia da 2 a 30 MHz crescendo con continuità a 100kHz/s.
- Quando il TX inizia la scansione anche il ricevitore si mette in ascolto sintonizzandosi alla stessa velocità.
- La scelta di tale modulazione è dovuta alla ridotta vulnerabilità alle interferenze e alla possibilità di impiegare basse potenze in trasmissione (ricordatevi il codice nei radar).



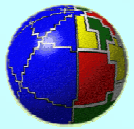
sincronizzati (GPS), ma non collegati

$f_{TX} = f_{REF} = f_0 + kt$ variazione della frequenza negli apparati

all'istante t_1 il TX trasmette $f_{TX1} = f_0 + kt_1$

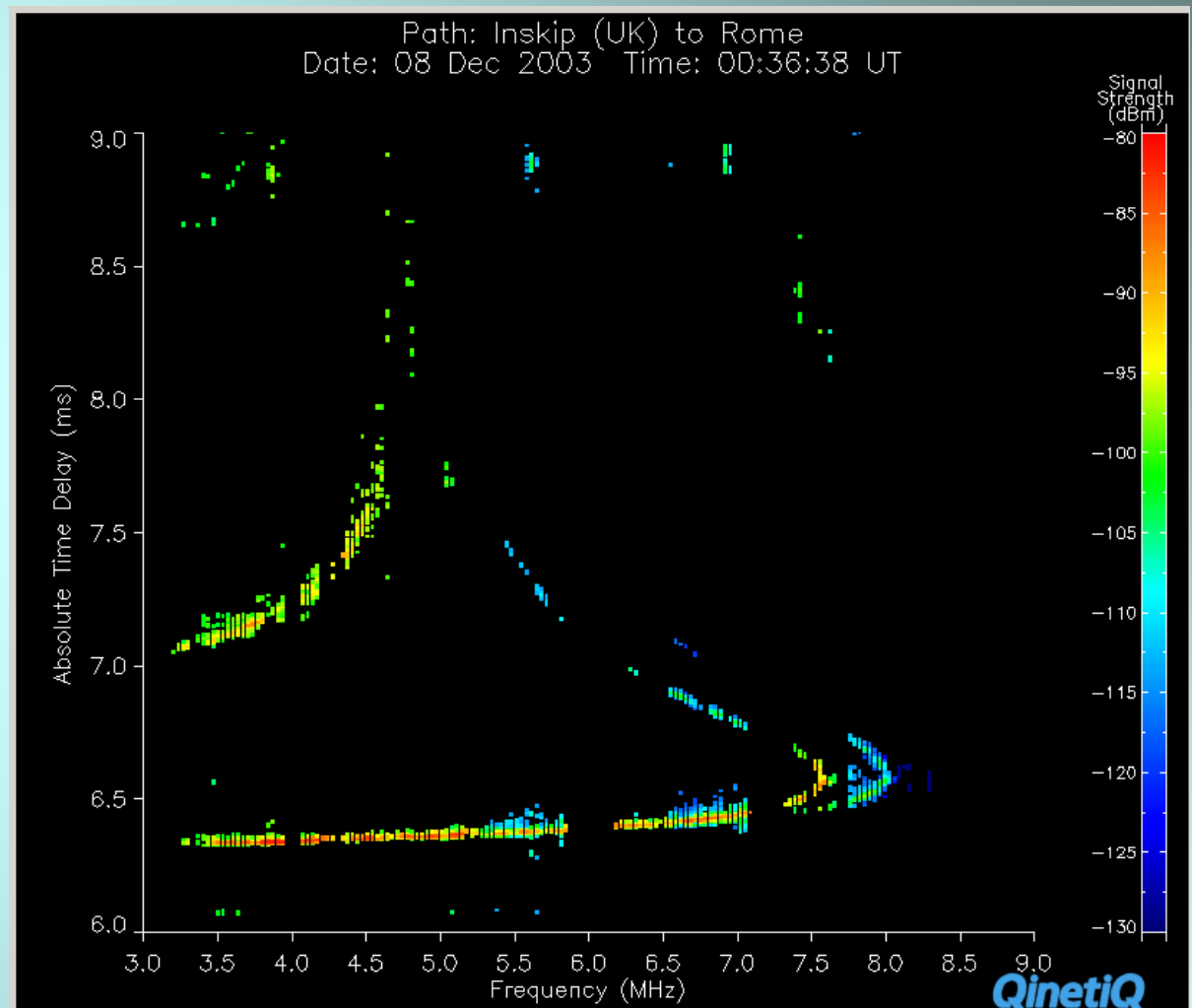
dopo un intervallo Δt l'onda arriverà al RX che sta generando $f_{REF} = f_0 + k(t_1 + \Delta t)$

la differenza delle frequenze (MIXER) mi da il tempo di ritardo $f_{REF} - f_{TX1} = k \cdot \Delta t$



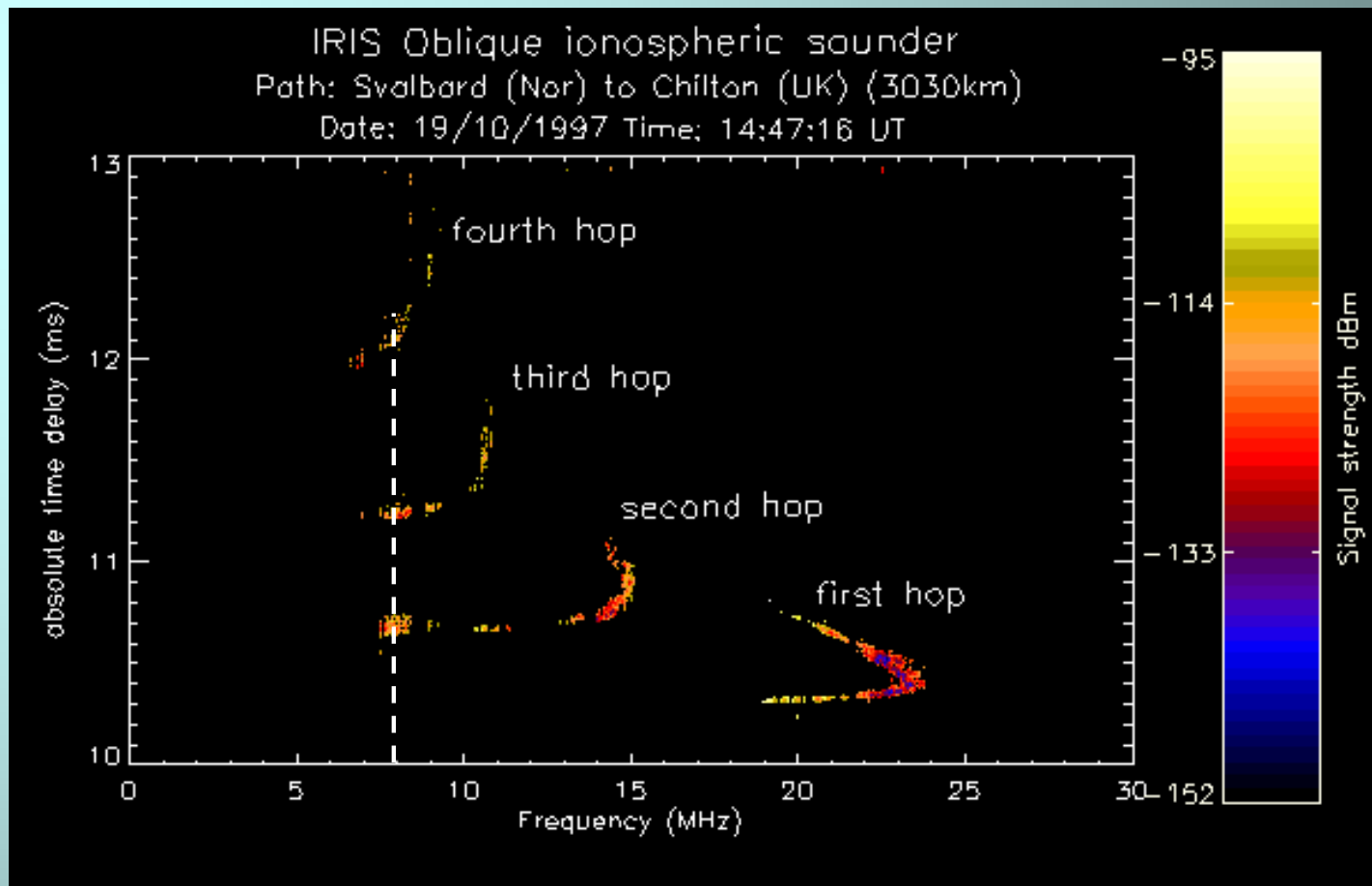
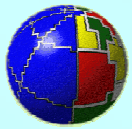
Anche qui il prodotto primo del sondaggio obliquo è lo ionogramma, un grafico che riporta i tempi di ritardo dell'onda in funzione della frequenza.

Nel mondo ci sono diverse decine di TX attivi dotati di antenna omni-direzionale. Tutti effettuano la scansione con le stesse modalità e le loro partenze sono organizzate secondo tabelle che permettono ad un RX di ricevere da diversi TX, non contemporaneamente.



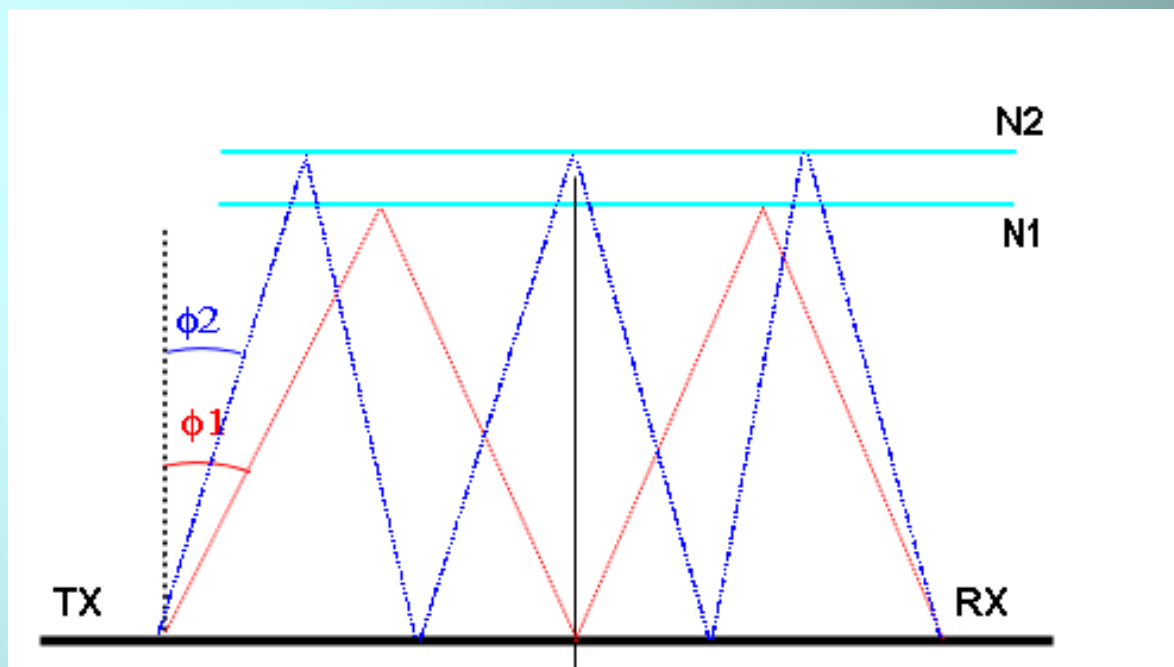
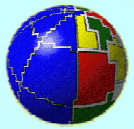
Appare subito evidente che per il calcolo corretto dei tempi il ritardo è di fondamentale importanza il sincronismo degli apparati.

Non essendoci alcun legame fisico tra TX e RX, esso è affidato solamente alla precisione dei loro orologi interni.

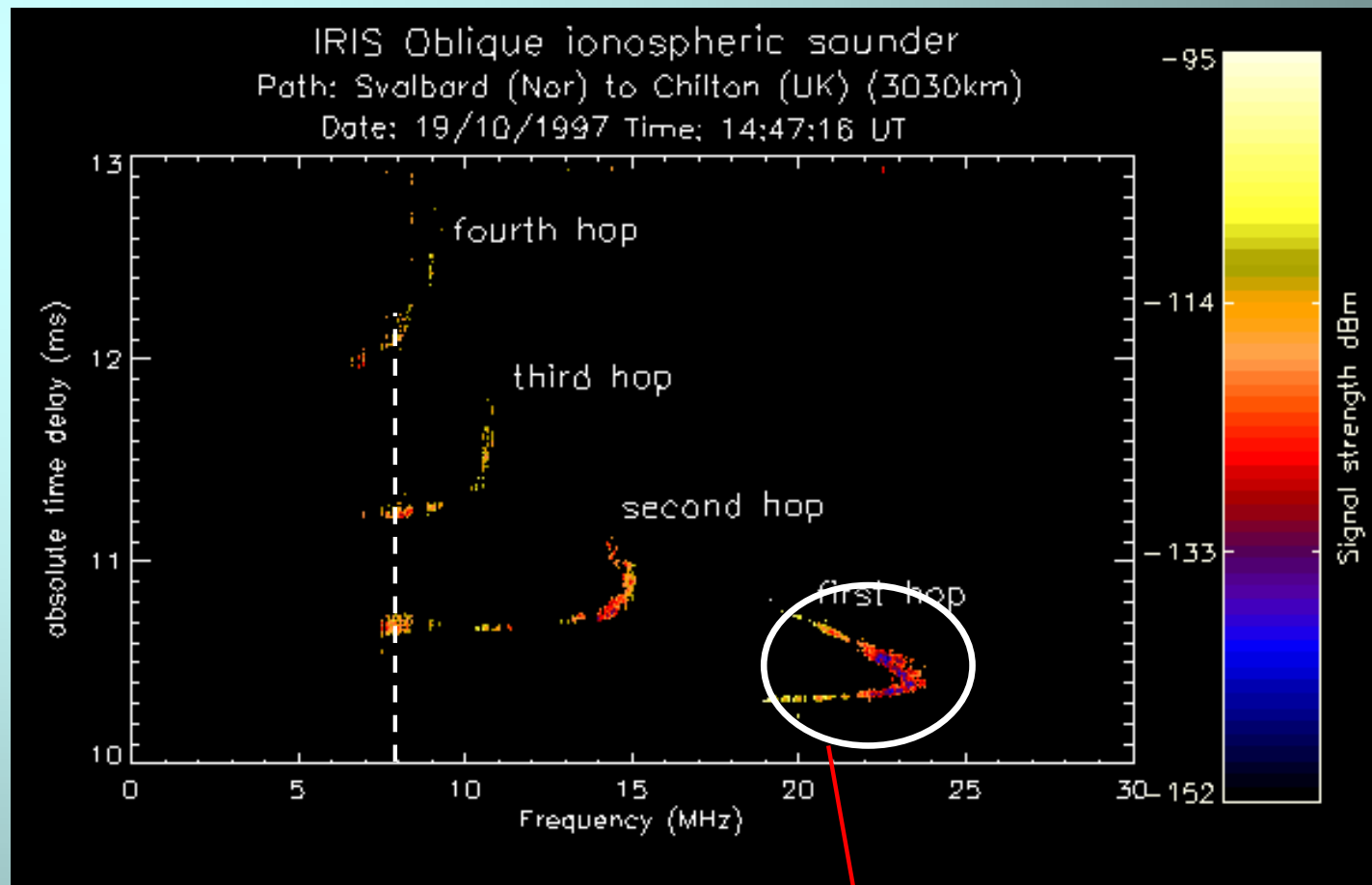
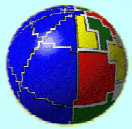


Dall'immagine dello ionogramma appaiono evidenti diversi aspetti:

- le frequenze a cui si ha riflessione sono decisamente più elevate di quelle a cui lo ionogramma verticale ci ha abituato ($<15\text{MHz}$).
- per alcuni valori di frequenza sembrano esserci più ritardi diversi.

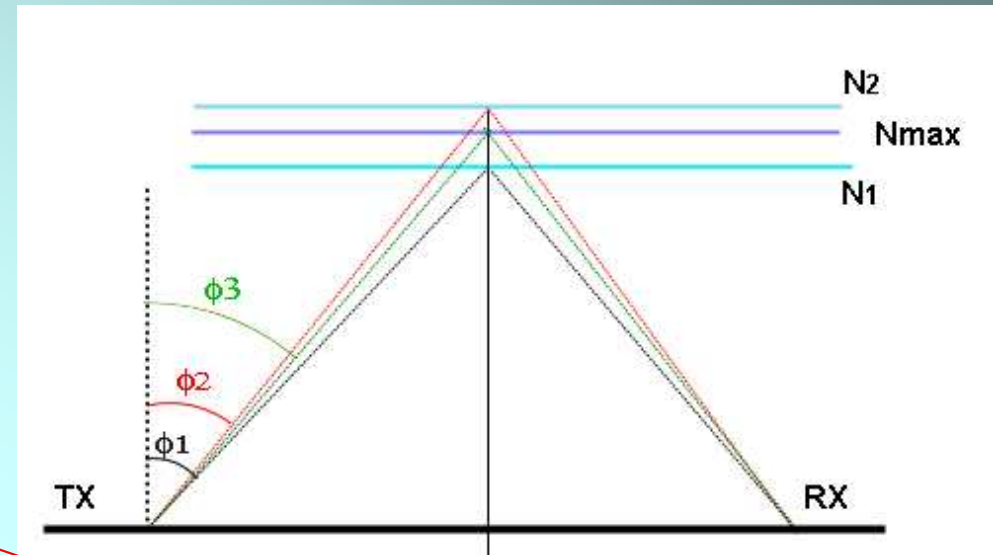
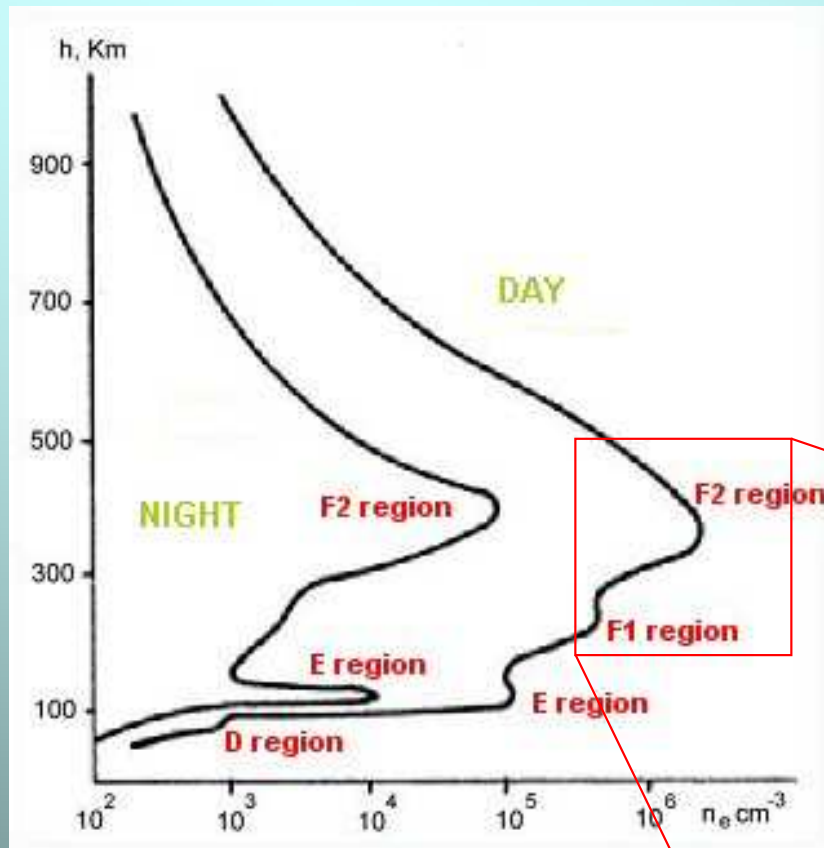
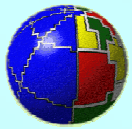


- Specialmente per le frequenze più basse, la riflessione è quasi verticale, quindi 2 o 3 riflessioni (a volte anche 4) ionosfera- terra sono possibili.



Dall'immagine dello ionogramma appaiono evidenti diversi aspetti:

- le frequenze a cui si ha riflessione sono decisamente più elevate di quelle a cui lo ionogramma verticale ci ha abituato ($<15\text{MHz}$).
- per alcuni valori di frequenza sembrano esserci più ritardi diversi.
- la traccia sembra tornare indietro (effetto Pedersen).

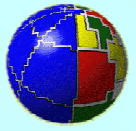


Vantaggi

- La comunicazione ionosferica viene studiata non attraverso misure indirette, ma con un esperimento che riproduce proprio il modo di comunicare.
- La massima frequenza osservabile è realmente la massima frequenza utilizzabile in quel collegamento in quel momento.
- Si possono avere informazioni sul profilo di densità sulla verticale del punto di mezzo che potrebbe essere irraggiungibile da terra.
- Un ricevitore in un punto può ricevere da diverse direzioni e quindi fornire informazioni su diversi percorsi.

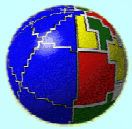
Svantaggi

- L'apparato di ricezione deve essere molto sensibile.
- Gli apparati di ricezione e trasmissione necessitano di temporizzatori assai precisi.
- L'elaborazione dello ionogramma è assai più complessa e non esiste un sistema automatico di interpretazione.

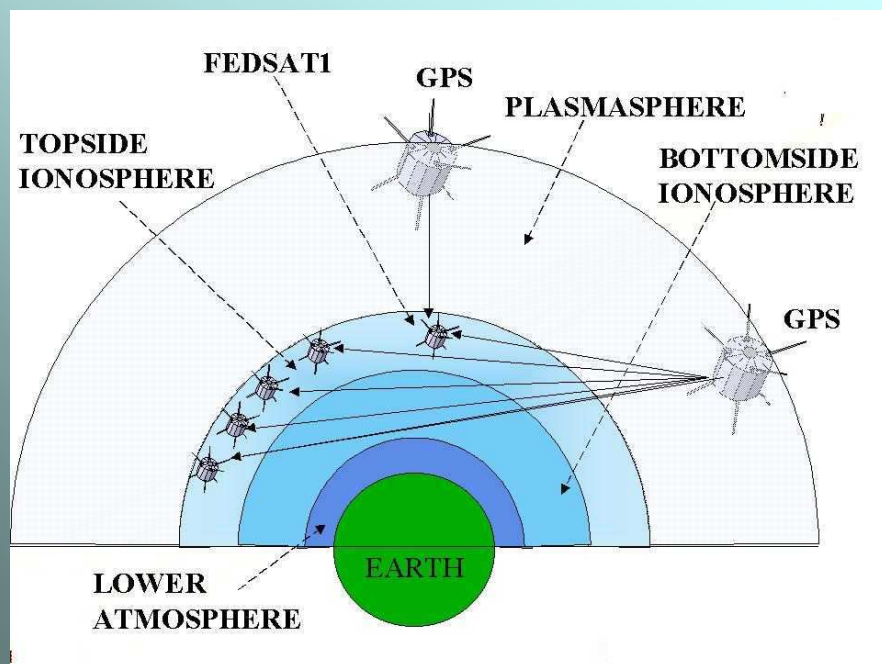


INGV

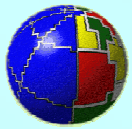
Radio beacon



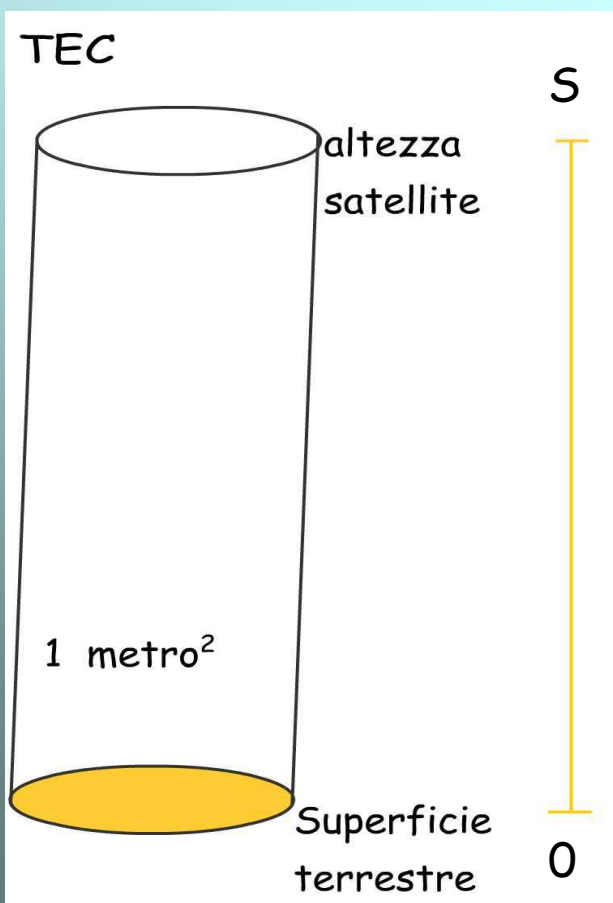
- Nel 1946 si notò una fluttuazione del segnale a 64MHz proveniente dalla costellazione del Cigno e si pensò ad una variazione della sorgente.
- All'inizio degli anni '50 si capì che le fluttuazioni erano dovute alla ionosfera.
- L'utilizzo di satelliti per lo studio della ionosfera cominciò sostanzialmente con il lancio dello Sputnik nel 1957. Si cominciò studiando l'attenuazione del segnale, e nei successivi decenni l'utilizzo dei trasmettitori su satellite ha fornito moltissime informazioni sulla morfologia globale della ionosfera con particolare riferimento al TEC (Total Electron Content) durante le tempeste magnetiche e ionosferiche.



- Inoltre grandezze come l'ampiezza, la fase, e l'angolo di arrivo di una radioonda che attraversa la ionosfera possono essere distorte se l'onda incontra irregolarità ferme o in movimento.
- Successivamente al già ricordato Sputnik furono lanciati altri satelliti, anche proprio dedicati allo studio dell'atmosfera terrestre, il più famoso dei quali è AT6 (1974). Questo radio beacon multi frequenza è stato progettato per misurare il contenuto elettronico tra TX e RX.
- Tra i satelliti usati per lo studio della ionosfera si può annoverare anche la costellazione GPS, anche se nata con scopi diversi da quelli ionosferici.



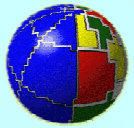
- Il TEC ci fornisce la misura del numero di elettroni contenuti in un cilindro di base 1 m^2 e di altezza il percorso preso in considerazione.
- Si tratta di una misura integrata, che dipende dal cammino tra noi ed il satellite.



$$TEC = \int_0^S N ds$$

$$TECU = 1 \text{ unità TEC} = 1 \times 10^{16} \text{ elettroni/m}^2$$

- La misura del TEC si può ottenere confrontando il comportamento di due frequenze emesse che percorrono lo stesso cammino.



partiamo dalla definizione di cammino di fase:

$$l = \int_0^S n(r) dr$$

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - jZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - jZ)} \pm \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1 - X - jZ)^2} + Y_L^2}} \quad \text{dove}$$

$$X = \frac{f_p^2}{f^2}$$

$$Y_T = \frac{f_{BT}}{f}$$

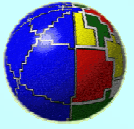
$$Y_L = \frac{f_{BL}}{f}$$

$$Z = \frac{v}{f}$$

le frequenze utilizzate sono ben al di sopra della frequenza di plasma; i termini Z , Y_T e Y_L possono essere trascurati di modo che la relazione diventa

$$n^2 = 1 - X \quad \text{da cui} \quad n = \sqrt{1 - X}$$

Espandendo in serie di Taylor (X piccolo) otteniamo una espressione di n valida per alte frequenze



$$n = 1 - \frac{1}{2} X$$

ricordiamo che $X = \frac{f_p^2}{f^2}$

Quindi n diventa: $n = 1 - \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f^2}$

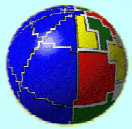
di conseguenza $l = \int_0^S \left(1 - \frac{1}{2} \frac{f_p^2}{f^2}\right) dr$

ma d'altra parte $f_p \approx 9\sqrt{N}$

da cui $l = \int_0^S \left(1 - \frac{81N}{2f^2}\right) dr = l_0 - \frac{40.5}{f^2} \int_0^S N dr$

d'altra parte $TEC = \int_0^S N(r) dr$

quindi $l = l_0 - \frac{40.5}{f^2} TEC$



- Consideriamo a questo punto due frequenze l_1 e l_2 emesse dal nostro satellite:

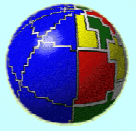
$$l_1 = l_0 - \frac{40.5}{f_1^2} TEC$$

$$l_2 = l_0 - \frac{40.5}{f_2^2} TEC$$

- A questo punto il TEC si riconduce ad una misura di differenza di **fase** tra due onde emesse dalla stessa sorgente.

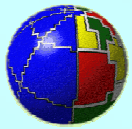
$$\Delta l = l_2 - l_1 = 40.5 TEC \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$$

- Quanto detto ha validità generale e vale anche per lo studio del TEC attraverso i ricevitori GPS

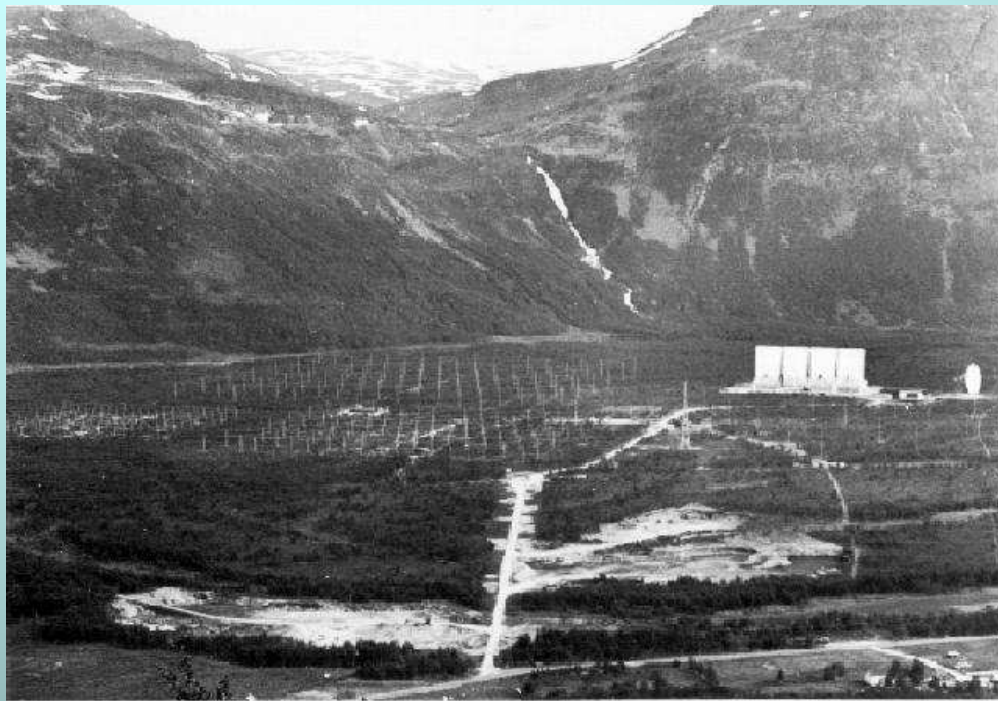
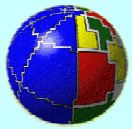


INGV

Riscaldamento HF



- Si usa la ionosfera quieta perturbandola e vedendo come ritorna alle condizioni quiete, oppure si inducono delle irregolarità artificiali in modo controllato per poterle studiare.
- L'idea che la ionosfera si potesse “scaldare” con un trasmettitore ad alta potenza ed una antenna ad elevato guadagno risale alla metà degli anni '30, ma impedimenti tecnologici ritardarono la messa in atto di questo metodo.
- Infatti erano necessarie centinaia di kW associate ad antenne ad alta direzionalità non ancora facilmente disponibili.
- Negli anni che seguirono fiorirono delle scuole in vari posti del mondo che misero a punto degli strumenti e sistemi per scaldare la ionosfera. Tra questi sia Arecibo che Tromsø hanno tuttora la possibilità di attuare esperimenti di questo tipo.
- Nel 1998 un razzo con una sonda per misure ionosferiche “in situ” fu lanciato nella zona di Arecibo per misura di campo elettrico e densità di plasma nella zona del riscaldamento.

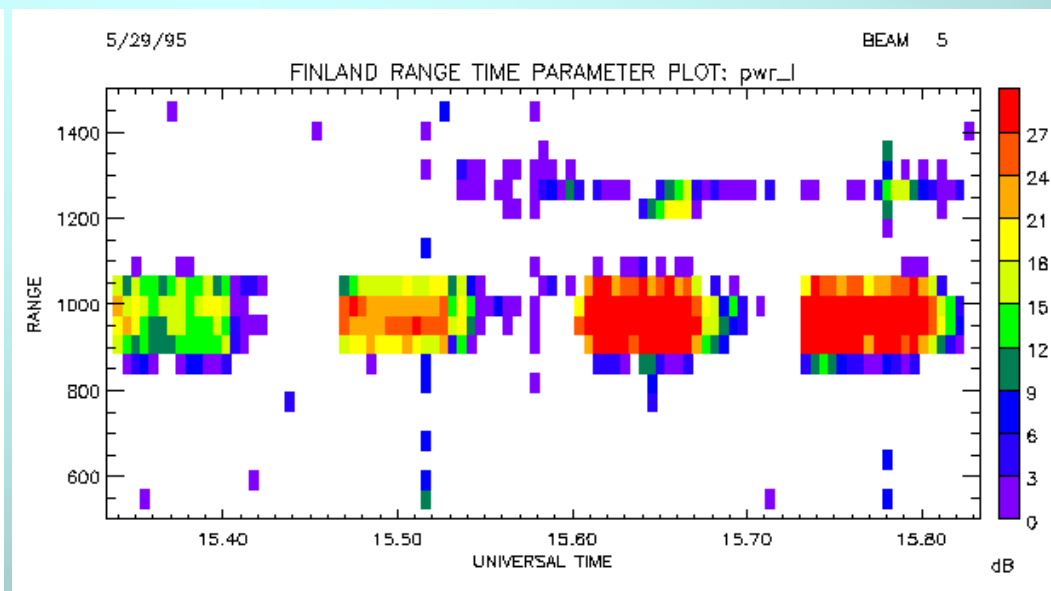
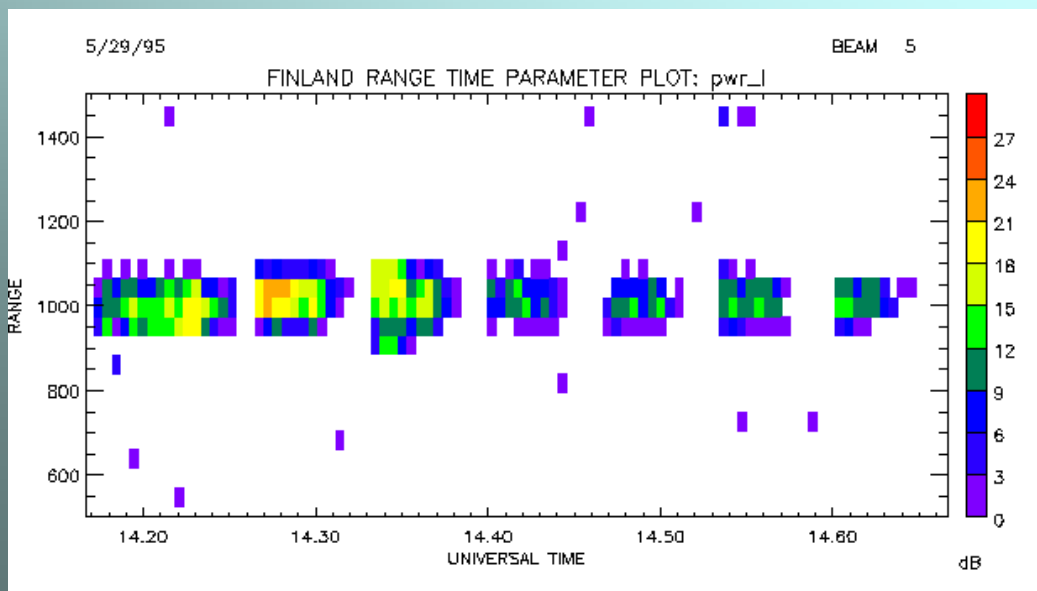


Come esempio è mostrato un tipo di misura effettuato con l'apparato di Tromsø (a lato).

Si notino le antenne disposte in array, unico arrangiamento che consente grande potenza e direzionalità.

In entrambe le figure sotto gli echi rappresentano l'energia retro-diffusa dagli strati più alti della regione F.

Nella figura di sinistra l'apparato di riscaldamento della ionosfera operava ad intermittenza ogni 2 minuti, mentre a destra ogni 4 minuti..

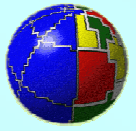


Vantaggi

- Si possono studiare diversi tipi di irregolarità su tutti gli strati della ionosfera

Svantaggi

- Costi altissimi.
- Vasta area per le antenne che devono avere un'alta direzionalità e di solito sono costituite da un array di dipoli.
- Alti consumi di potenza.
- Lavora intorno alla frequenza critica dello strato F che cambia. Sono necessari continui aggiustamenti delle antenne che non hanno una banda tanto larga.



INGV

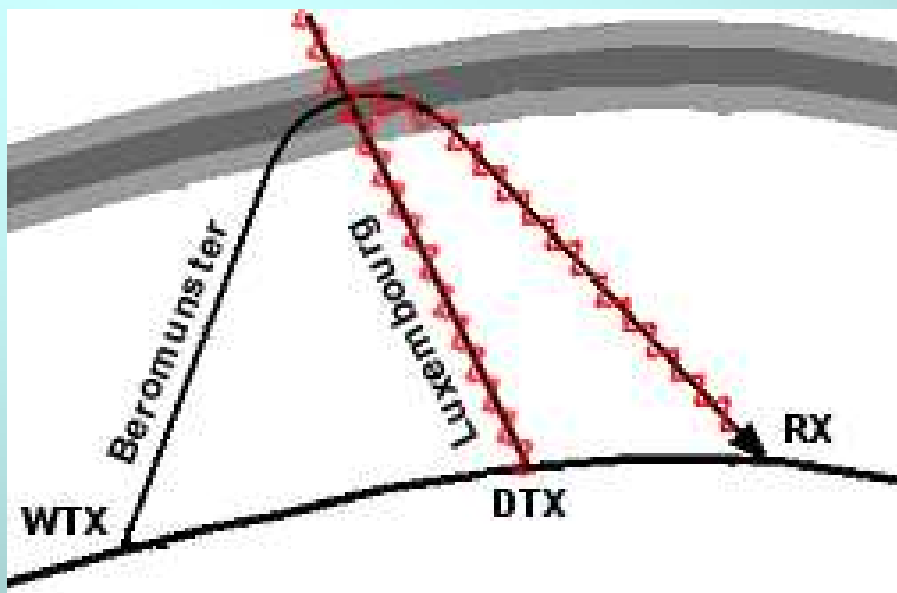
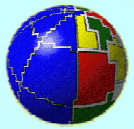
Cross modulation

Le prime osservazioni del fenomeno di modificazione della ionosfera terrestre per mezzo di onde a radio frequenza di alta potenza risalgono al 1933, anno in cui si osservò che la ricezione in Olanda del segnale a 650kHz di Radio Beromünster (Svizzera: segnale voluto) era sovrapposta al segnale di Radio Lussemburgo (250kHz) (indesiderato).



Poco dopo, nel 1934, venne la spiegazione: l'effetto era stato causato dalla potenza del trasmettitore di Radio Lussemburgo che aveva modificato le caratteristiche trasmissive della ionosfera; in pratica aveva modulato il movimento caotico (temperatura) degli elettroni.

Quando il segnale di Radio Beromünster passò attraverso la regione così modificata la sua propagazione ne risultò influenzata, così che la modulazione di ampiezza di un segnale si trasferì all'altro. Da quel momento si parlò dapprima di “Luxembourg effect” e poi di cross-modulation.



- WTX = Wanted Transmitted (segnale voluto)
- DTX = Disturbing Transmitter
- RX = Receiver

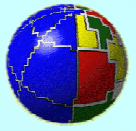
- Dopo aver compreso il meccanismo che c'è dietro, si pensò di usare questa tecnica per perturbare la ionosfera quieta vedendo come si comportava.
- Tuttavia la tecnica presentava degli aspetti critici; infatti da una parte si voleva che la regione D fosse sufficientemente assorbente da essere riscaldata, ciò impediva la riflessione dell'onda voluta.
- Usati ancora fino agli anni 70, poi soppiantate da ISR.

Vantaggi

- Profili di densità e frequenza di collisione nell'intervallo 50-90 km

Svantaggi

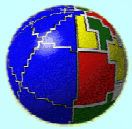
- Si possono investigare solo porzioni ridotte di ionosfera ed in più:
- Costi e potenze altissimi
- Vasta area per le antenne che devono avere un'alta direzionalità e grande guadagno di solito ottenuto mediante un array.



INGV

Sondaggio verticale

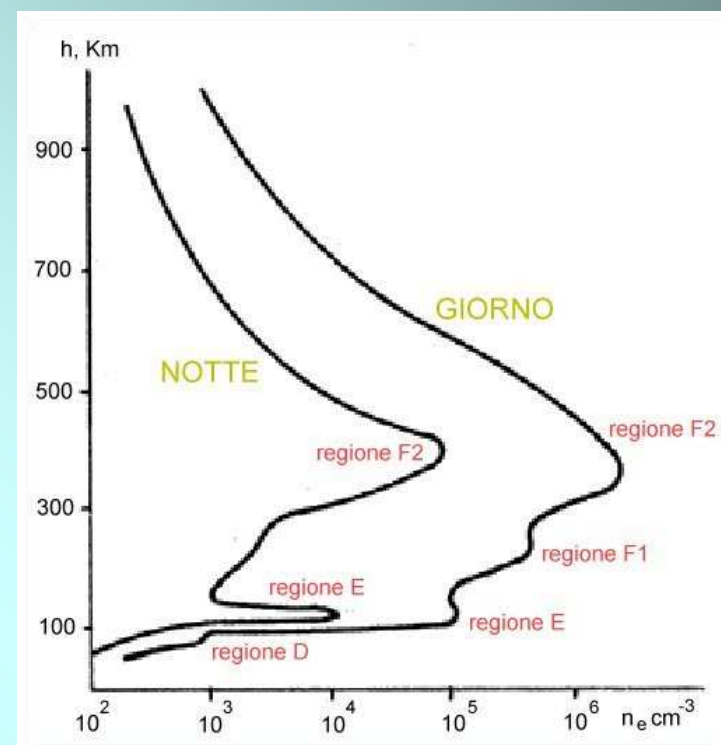
- La misura consiste nell'inviare nella ionosfera impulsi di energia a diverse frequenze misurando il ritardo dell'eco retrodiffuso dalla ionosfera per evidenziare la posizione degli strati ionosferici al variare della frequenza.
- Nell'operazione di inviare energia nella ionosfera e riceverne l'eco si sottintende l'uso di opportune antenne.
- Lo strumento in grado di effettuare questa misura si chiama ionosonda ed è considerato il progenitore del radar. Infatti il primo sondaggio verticale con tecnica impulsata fu effettuato nel 1925 con uno strumento messo a punto da Breit e Tuve anche se la riflessione ionosferica era già stata ipotizzata e sperimentata negli anni precedenti.
- Lo scopo del sondaggio verticale è quello di ricavare l'altezza dei vari strati ionosferici in funzione della frequenza.
- Successivamente si lavora sul grafico così ottenuto (ionogramma) per ricavare i principali parametri ionosferici e, a seguire, l'eventuale profilo di densità.
- Sebbene solo lo ionogramma sia la misura diretta è considerato il principale metodo di studio della ionosfera ed anche uno dei più diffusi.

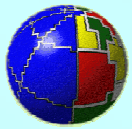


- Ripassiamo il principio su cui si basa la misura.
- La ionosfera è caratterizzata da un profilo di densità elettronica, cioè da una distribuzione di N con la quota.
- In definitiva si può parlare di plasma con una frequenza di plasma pari a

$$f_p = \sqrt{\frac{Nq^2}{4\pi^2\epsilon_0 m}} \approx 9\sqrt{N}$$

- Per ogni frequenza utilizzata la riflessione avverrà alla quota a cui corrisponde una densità elettronica tale da annullare l'indice di rifrazione; in particolare la riflessione avviene solo se $f = f_p$. Dal momento che la frequenza di plasma varia con N e di conseguenza con la quota, variando la frequenza si ottengono riflessioni da quote diverse.





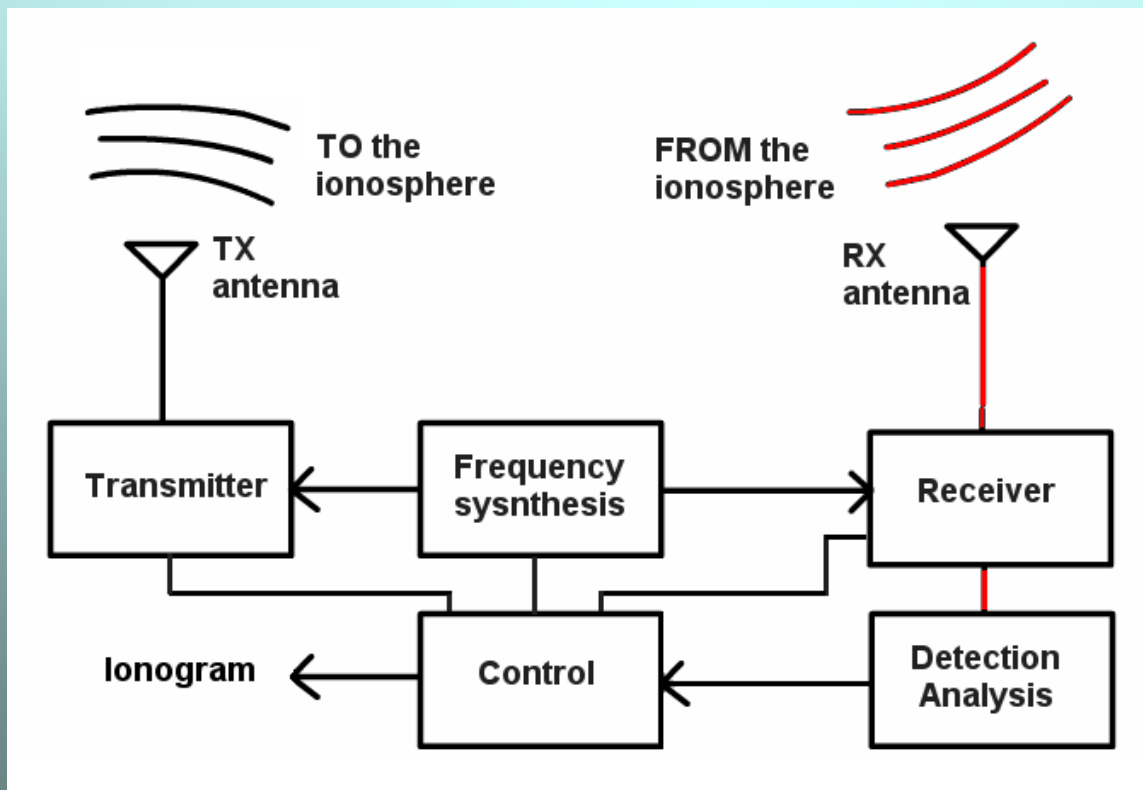
- Radar in campo HF in cui impulsi di frequenza variabile da 1 a 20 MHz sono trasmessi da una antenna trasmittente e ricevuti da una ricevente.
- L'altezza dello strato riflettente è legata al ritardo d'eco Δt dalla relazione

$$h' = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

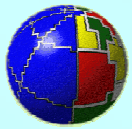
Un sintetizzatore di frequenza genera la frequenza da inviare in quell'istante e mette il ricevitore in condizioni di sintonizzarsi su tale frequenza.

Il sistema di controllo abilita il trasmettitore ad emettere energia ed appena inviato l'impulso mette il ricevitore in ascolto per ricevere l'eco.

Il ricevitore è seguito da un blocco di elaborazione che individua i tempi di ritardo dei segnali ricevuti.



Queste funzioni sono comuni ad ogni tipo di ionosonda, la realizzazione di esse differenzia i vari modelli.



- Un radar è progettato per soddisfare dei requisiti che dipendono dal bersaglio e dai fenomeni che vogliamo evidenziare

Intervallo di frequenza: (1 - 20) MHz a passi di 50 kHz o 100 kHz

Risoluzione: < 20 km

Altezza minima ~ 90 km

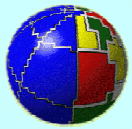
Altezza massima > 600 km

Grossa attenuazione

$$\frac{\text{Rx power}}{\text{Tx power}} = 10^{-13} \rightarrow -130\text{dB}$$

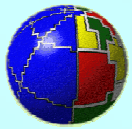
Il bersaglio è più simile ad un piano infinito riflettente (strato ionizzato) più che a un insieme di singoli punti (radar cross section). Ecco come si trasforma l'equazione radar:

$$\cancel{P_r = \frac{(\lambda G_d)^2 \sigma P_{rad}}{(4\pi)^3 r^4}} \longrightarrow P_r = \frac{(\lambda G_d)^2 P_{rad}}{(4\pi r)^2 L}$$



Confronto tra le prestazioni di una ionosonda degli anni 70 (inviluppo) ed una degli anni 90 (compressione di impulsi)

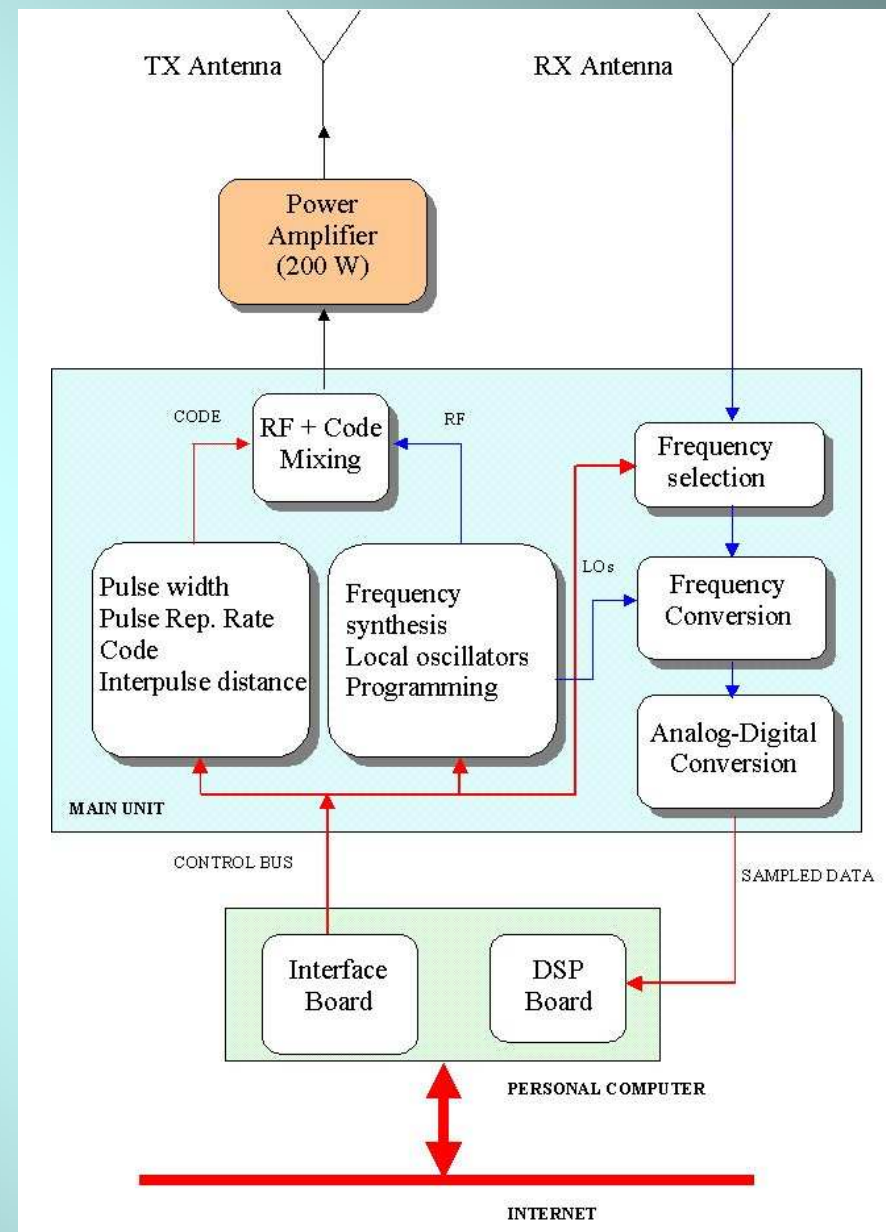
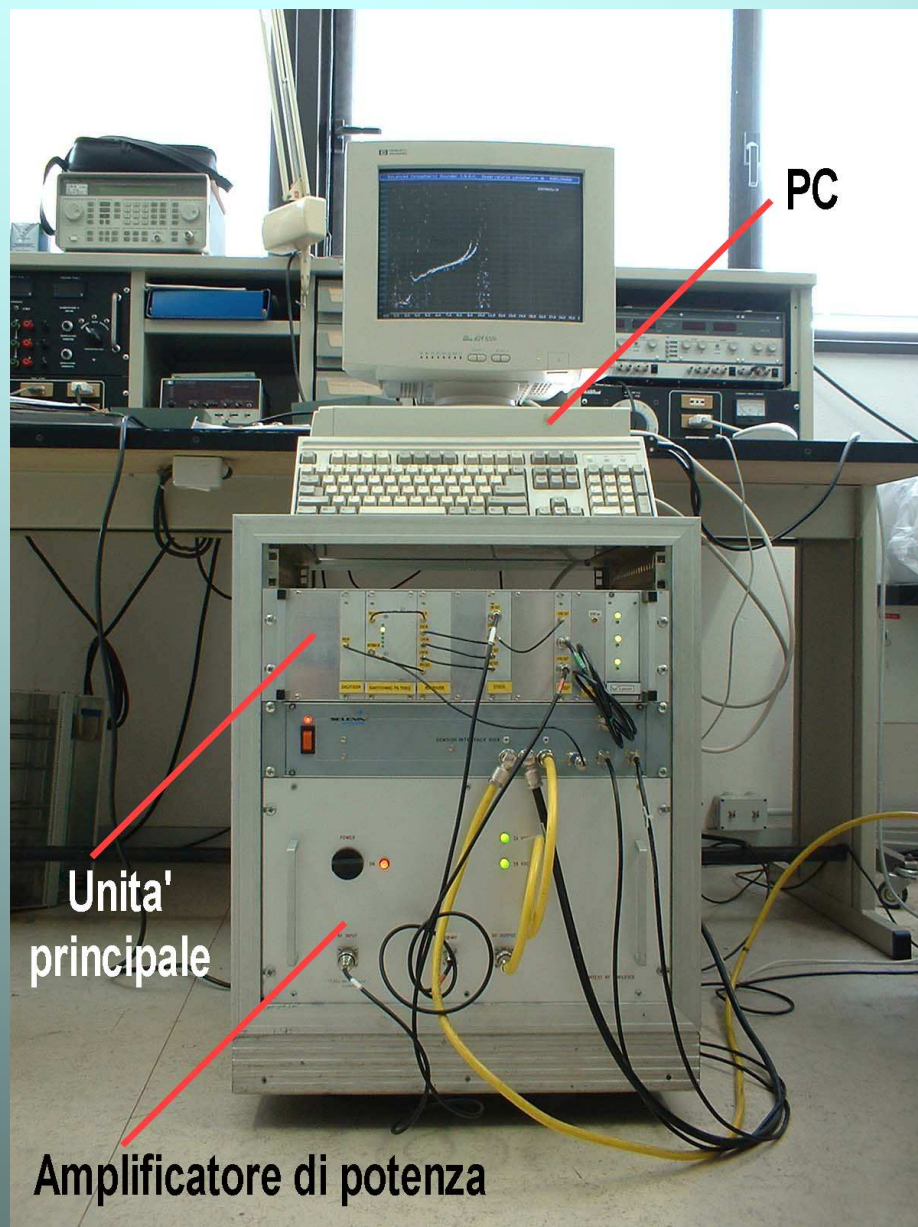
	Inviluppo	Compressione Impulsi
Range frequenza	1 – 20 MHz	1 – 20 MHz
Range di altezza	90 – 700 km	90 – 700 km
Ampiezza impulso	100 μ s	480 μ s (subimpulso 30 μ s)
Potenza TX	> 5 kW	250 W
Risoluzione in altezza	15 km	5 km
Frequenza di ripetizione	100 Hz	30 Hz
Ricezione	Analogica (inviluppo)	Digitale (correlazione)
Output (ionogramma)	Carta o pellicola	file

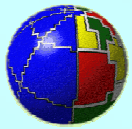


INGV

Un esempio reale: la ionosonda AIS-INGV (brevetto italiano INGV nel 2004)

Sondaggio verticale 6/15

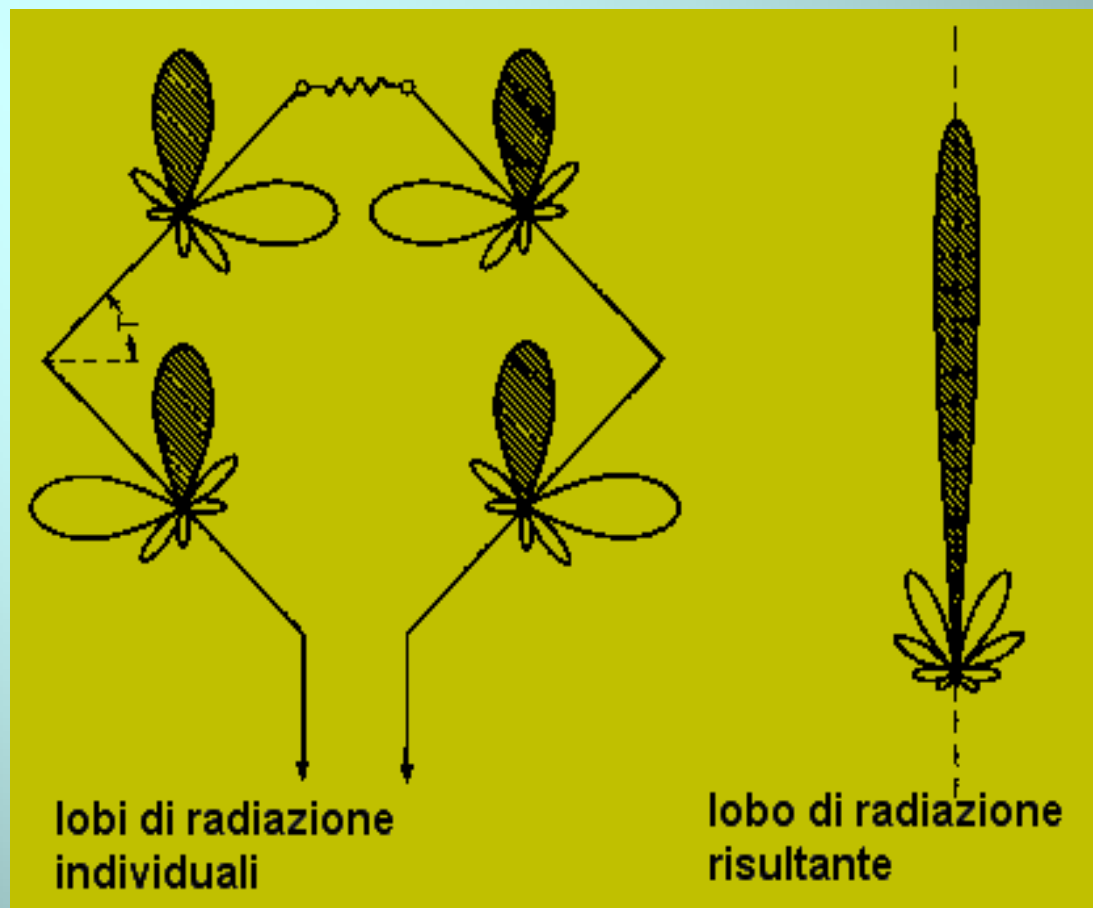


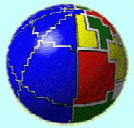


- Devono essere a larga banda, per trasmettere e ricevere segnali in un ampio intervallo di frequenze, quindi l'uso di un semplice dipolo è escluso.
- Devono avere il lobo di radiazione verso l'alto.
- Devono consentire un buon guadagno visto che l'attenuazione ionosferica e geometrica riducono fortemente il segnale ricevuto.

Una soluzione è costituita dall'antenna rombica, detta così proprio a motivo della sua forma (vedi figura). Ogni lato del rombo è all'incirca pari alla lunghezza d'onda del segnale da trasmettere (30m a metà della banda utile ~10MHz).

Il carico resistivo che porta sulla sua sommità ha la doppia funzione di allargare la banda ed aumentare la direzionalità verso quel vertice.



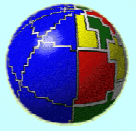


Vantaggi

- Impedenza e guadagno variano poco con la frequenza (larga banda);
- sono molto efficienti;
- a parte le dimensioni sono facili da costruire.

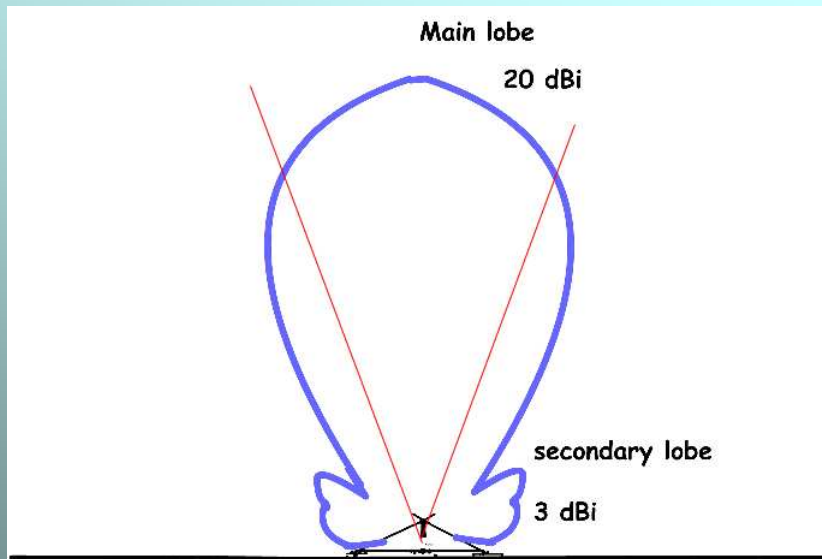
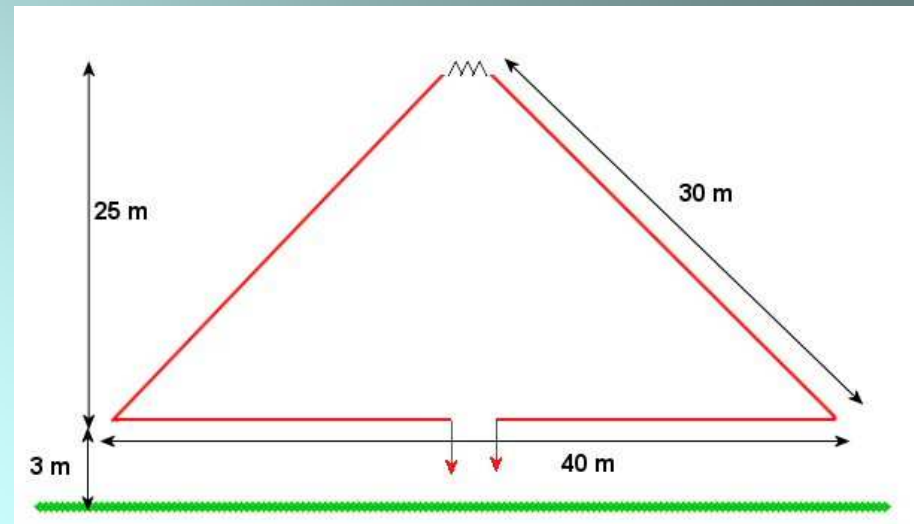
Svantaggi

- Dimensioni (altezze oltre i 50 m e vertici sospesi a 20 m d'altezza);
- direzionalità non elevata;
- parte della potenza è dissipata sulla resistenza di carico alla sommità.



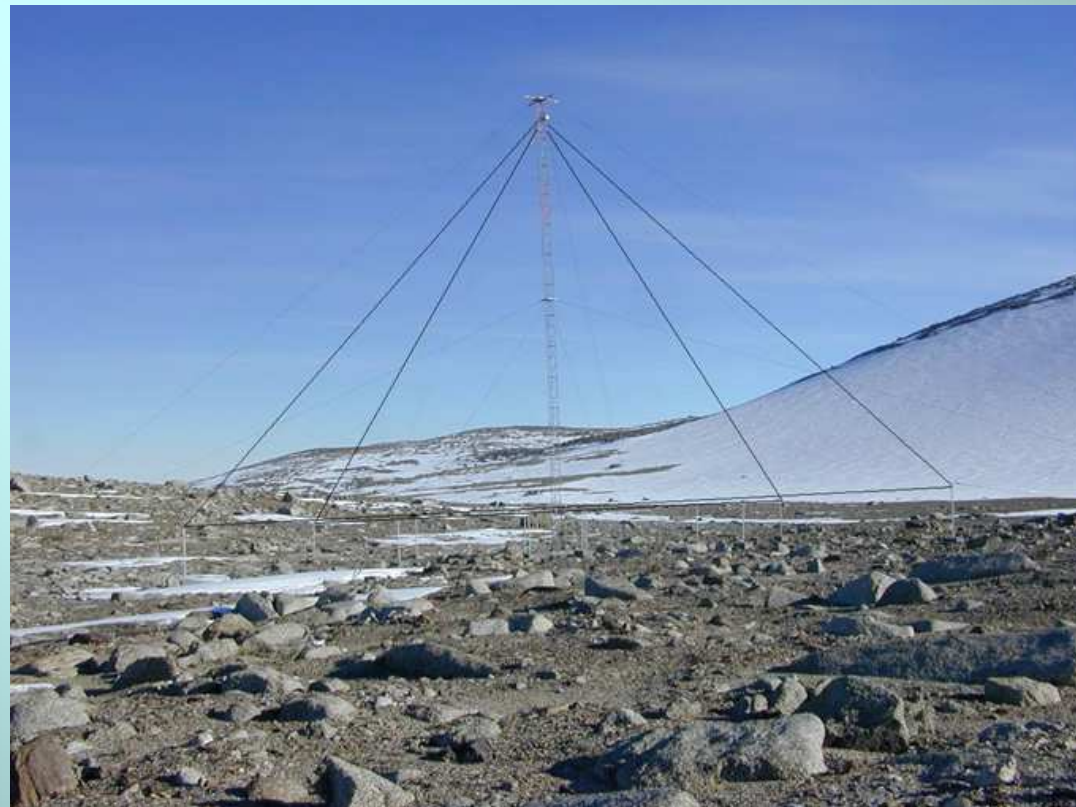
Una semplificazione è costituita dall'antenna "delta" costituita da mezza antenna rombica. Si può ricondurre alla rombica ipotizzando una "immagine" dalla parte del terreno.

La composizione dei lobi di radiazione e la larghezza di banda dovuta alla resistenza di carico sono simili. Sono meno efficienti ma richiedono metà altezza.



Il lobo di radiazione è ampio circa 60° che significa illuminare un cerchio di 350km di diametro a 300km di altezza.

Questo significa che la misura verticale è comunque mediata su una area così vasta.



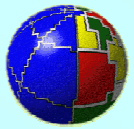


Grafico che riporta le altezze virtuali di riflessione sugli strati ionosferici in funzione della frequenza.

L'altezza di riflessione grafica non è l'altezza reale h dove si trova lo strato.

Infatti come è chiaro lo strumento misura il tempo di ritardo che, nello ionogramma, è trasformato in km utilizzando

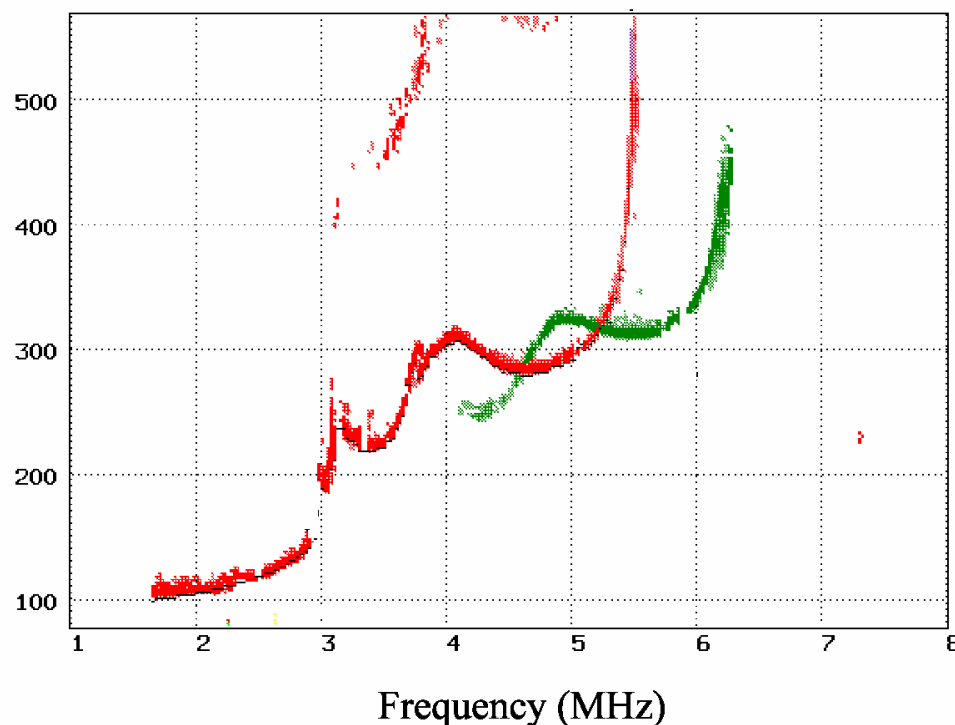
$$h' = \frac{c \cdot \Delta t}{2}$$

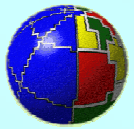
ipotizzando cioè che l'intero percorso sia fatto a velocità c .

Man mano che l'onda penetra la sua velocità diminuisce, di modo che $h < h'$

La presenza del campo magnetico terrestre fa nascere un secondo indice di rifrazione che crea il raggio straordinario.

Height (km)





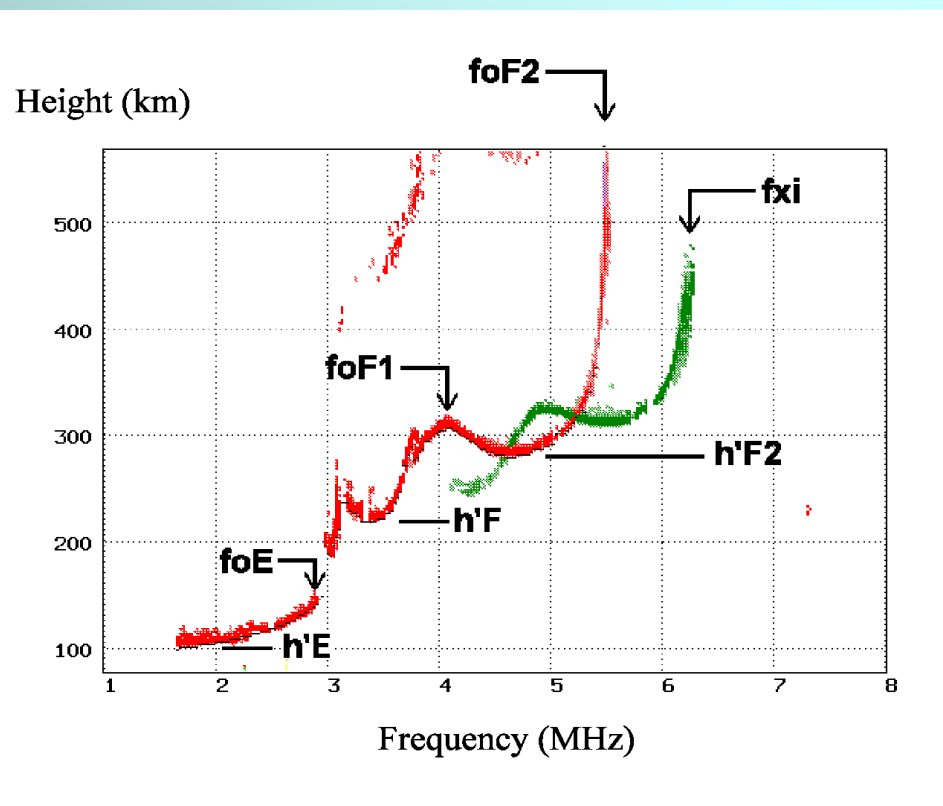
Dallo ionogramma ai parametri ionosferici

Una volta ottenuto lo ionogramma il lavoro prosegue per ottenere dapprima le caratteristiche ionosferiche e, successivamente, il profilo di densità sulla verticale.

Da uno ionogramma si possono ricavare importanti informazioni su diversi parametri ionosferici:

le frequenze critiche f_oE , f_oF1 , f_oF2 , f_xI → a cuspidi, massimi, asintoti

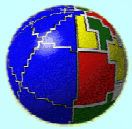
le altezze virtuali degli strati → minimi relativi



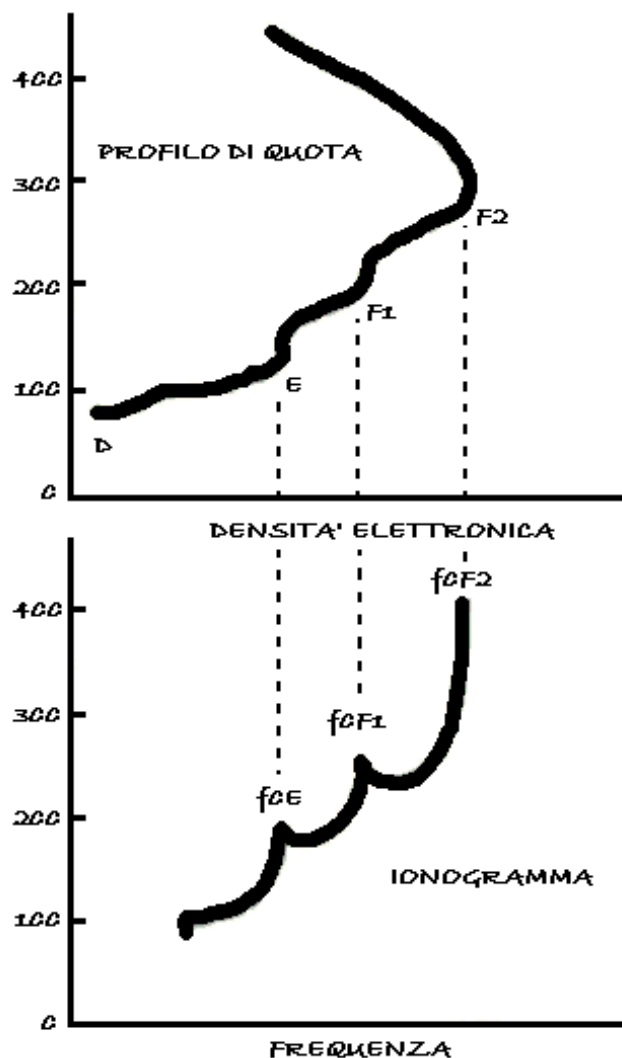
MUF(3000)F2: massima frequenza utilizzabile per un radiocollegamento su una distanza di 3000 km immaginando che il sito del sondaggio verticale sia in mezzo.

I parametri così ottenuti entrano a far parte di un DB e rappresentano la storia della ionosfera del sito.

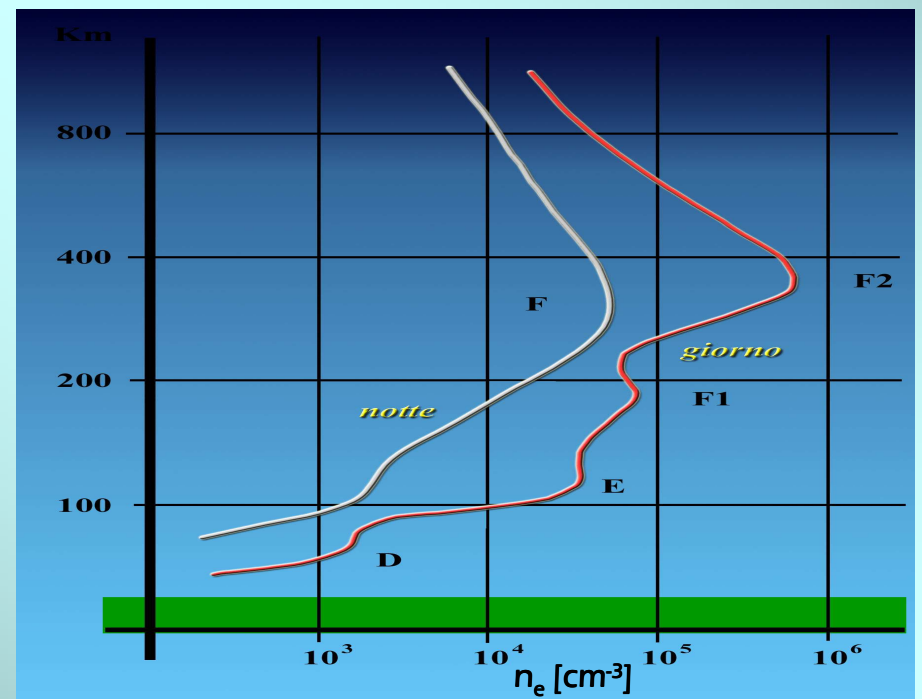
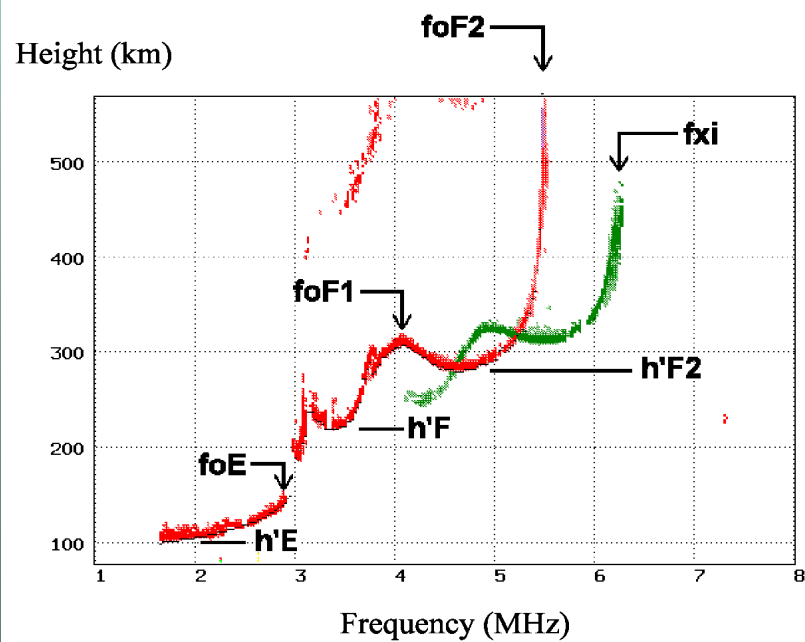
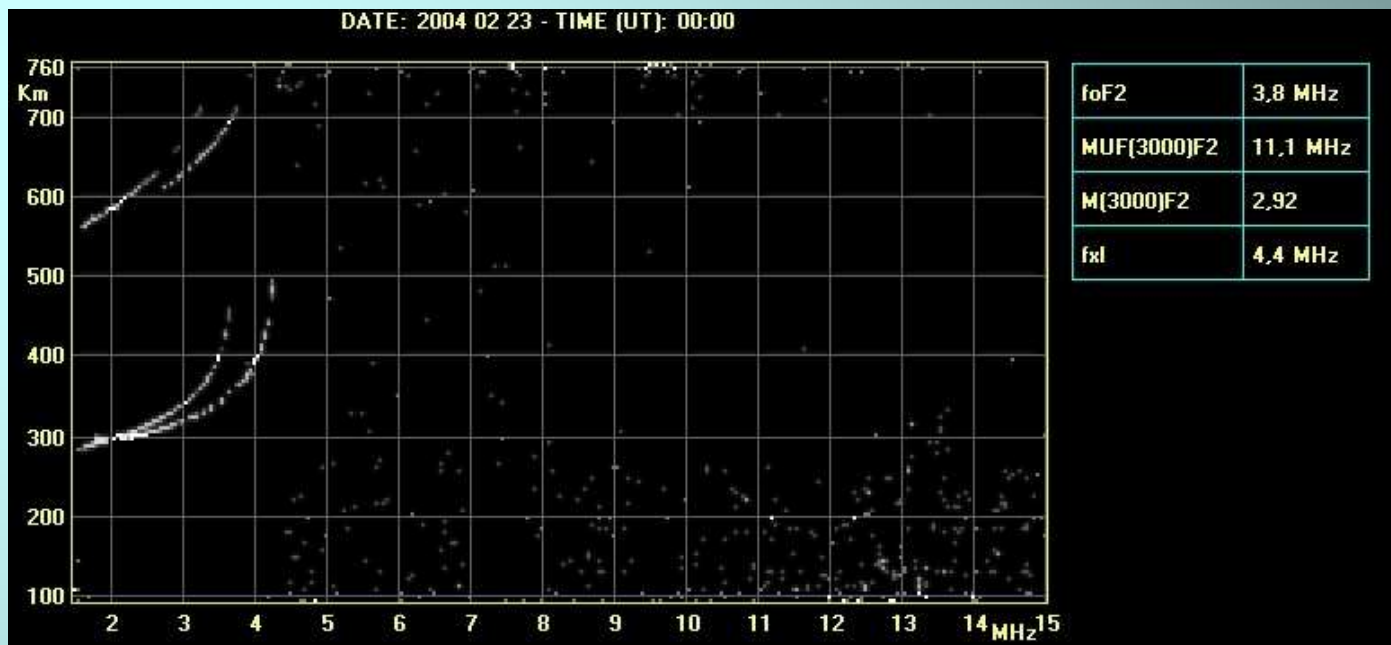
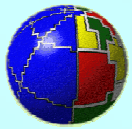
Insieme a parametri elio geofisici entrano nelle previsioni ionosferiche.

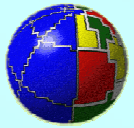


Dallo ionogramma al profilo di densità

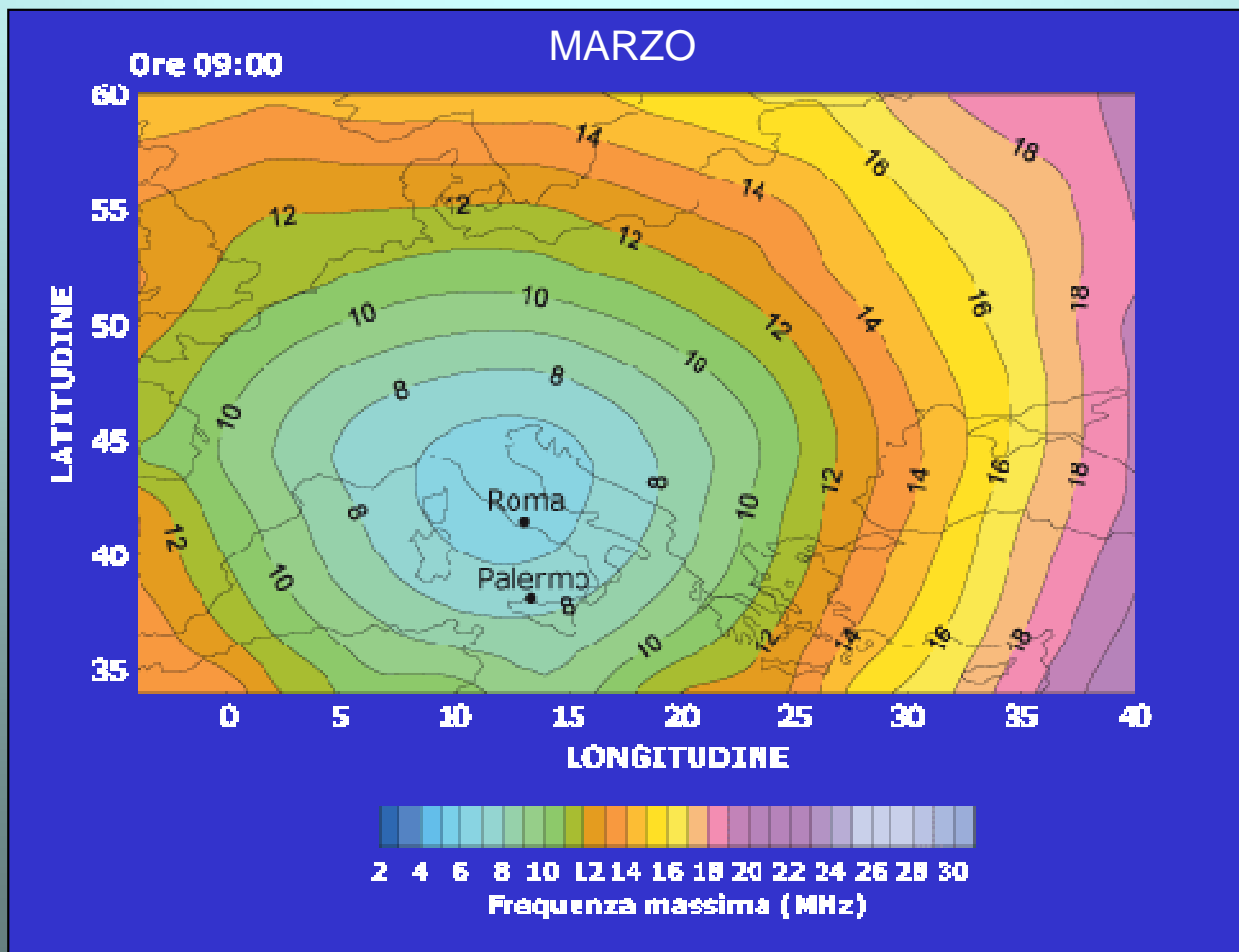


- modelli semiempirici che descrivono le singole regioni ionosferiche a partire dai parametri misurabili e da grandezze elio-geofisiche.
- modelli e dai parametri troviamo un profilo di densità
- dal profilo di densità appena trovato si ricava a ritroso lo ionogramma e lo si confronta con quello ottenuto dalla misura.
- si varia il profilo fino ad ottenere lo ionogramma più vicino a quello reale.
- questo metodo può essere eseguito automaticamente a seguito di un sondaggio stesso





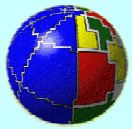
L'utilità di misure orarie da oltre 50 anni risiede nell'aver contribuito alla produzione di modelli di variabilità ionosferica sufficientemente precisi da poter prevedere in anticipo di diversi mesi quali saranno le condizioni di frequenza migliori per effettuare un radio collegamento tra il punto A ed il punto B in un dato momento dell'anno e del giorno.



Una figura come questa ci suggerisce le frequenze da usare nel mese di marzo alle 9.00 del mattino per avere una probabilità di successo del 50% (previsioni a lungo termine).

Le isolinee rappresentano la distanza di skip e la MUF per cui si raggiunge tale distanza.

Per esempio nel caso indicato tra Roma e Palermo, si dovrebbe usare una frequenza tra 6 e 8MHz.



Nuovo ruolo per la ionosonda

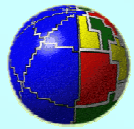
- Sebbene le previsioni ionosferiche per le medie latitudini siano in grado di prevedere l'andamento dei parametri utili per le comunicazioni radio con molti giorni di anticipo, variazioni occasionali dovuti alla variabilità ionosferica sono sempre possibili.
- Le moderne ionosonde, dotate di interpretazione automatica dello ionogramma, rendono possibili correzioni delle condizioni previste entro pochi minuti dal sondaggio.
- In particolare si effettua un confronto tra i valori ottenuti per un parametro ed il suo valore previsto dal modello. Se lo scostamento è alto, si elabora il nuovo valore e lo si usa nei radio collegamenti.
- La ionosonda è diventata ormai uno strumento di monitoraggio tanto che il suo futuro è quello di costituire delle reti collegate via web tra di loro per una completa mappatura della ionosfera.

Vantaggi

- È uno strumento relativamente semplice;
- permette funzionamento in automatico (senza presenza umana);
- opportunamente collegate possono costituire una rete necessaria per la mappatura delle caratteristiche ionosferiche.

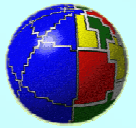
Svantaggi

- La misura diretta dà solo parametri ionosferici;
- la misura è localizzata sulla verticale;
- le antenne di dimensioni decametriche ne limitano la portabilità.

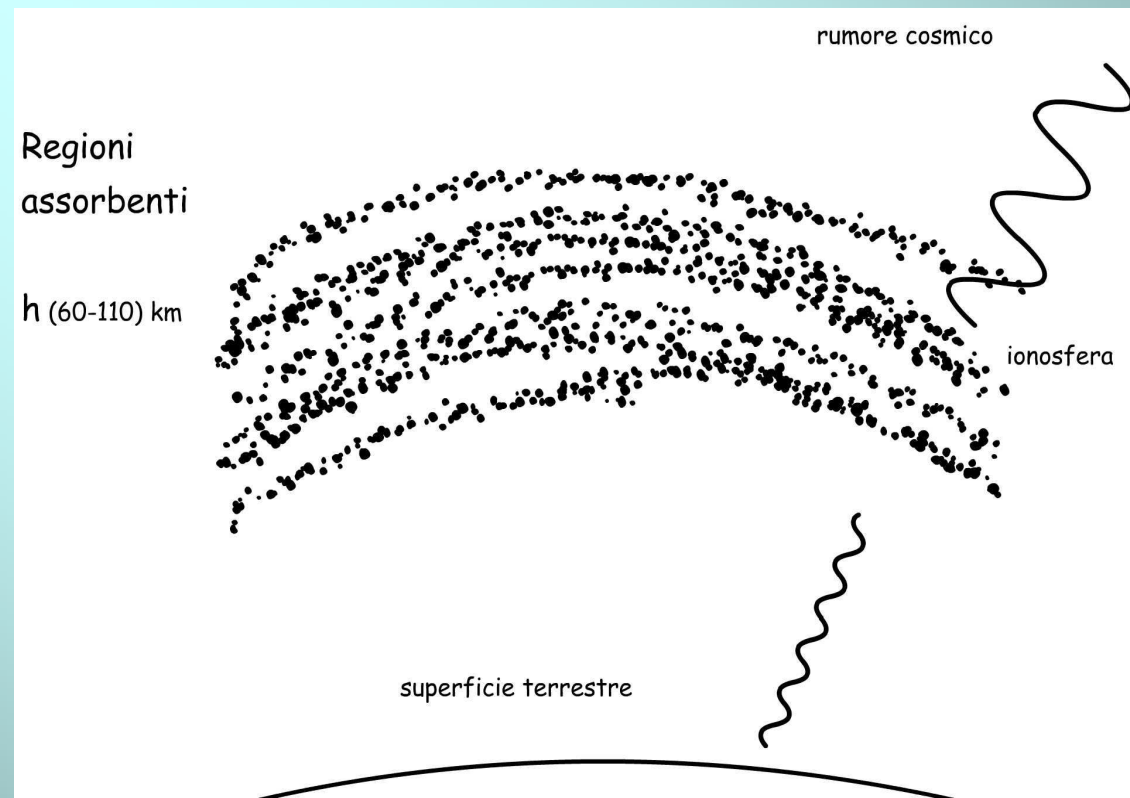


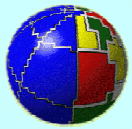
INGV

Riometro



- Metodi di studio della ionosfera che si basano sulla riflessione degli strati ionosferici falliscono in presenza di un forte assorbimento ionosferico, visto che non c'è energia retrodiffusa dagli strati stessi. Un tale assorbimento si può avere, ad esempio, quando elettroni energetici associati con fenomeni aurorali impattano sull'alta atmosfera ionizzando la ionosfera a basse quote (90 km).
- Inoltre metodi come il sondaggio ionosferico verticale non danno indicazioni su altezze inferiori a 90 km, visto il forte assorbimento dello strato D.
- In questi casi è indicato l'uso del riometro.
- Il termine riometro è l'italianizzazione del termine inglese “Riometer”, acronimo di **Relative Ionospheric Opacity METER**. In sostanza si tratta di strumenti in grado di misurare l'opacità ionosferica relativa.

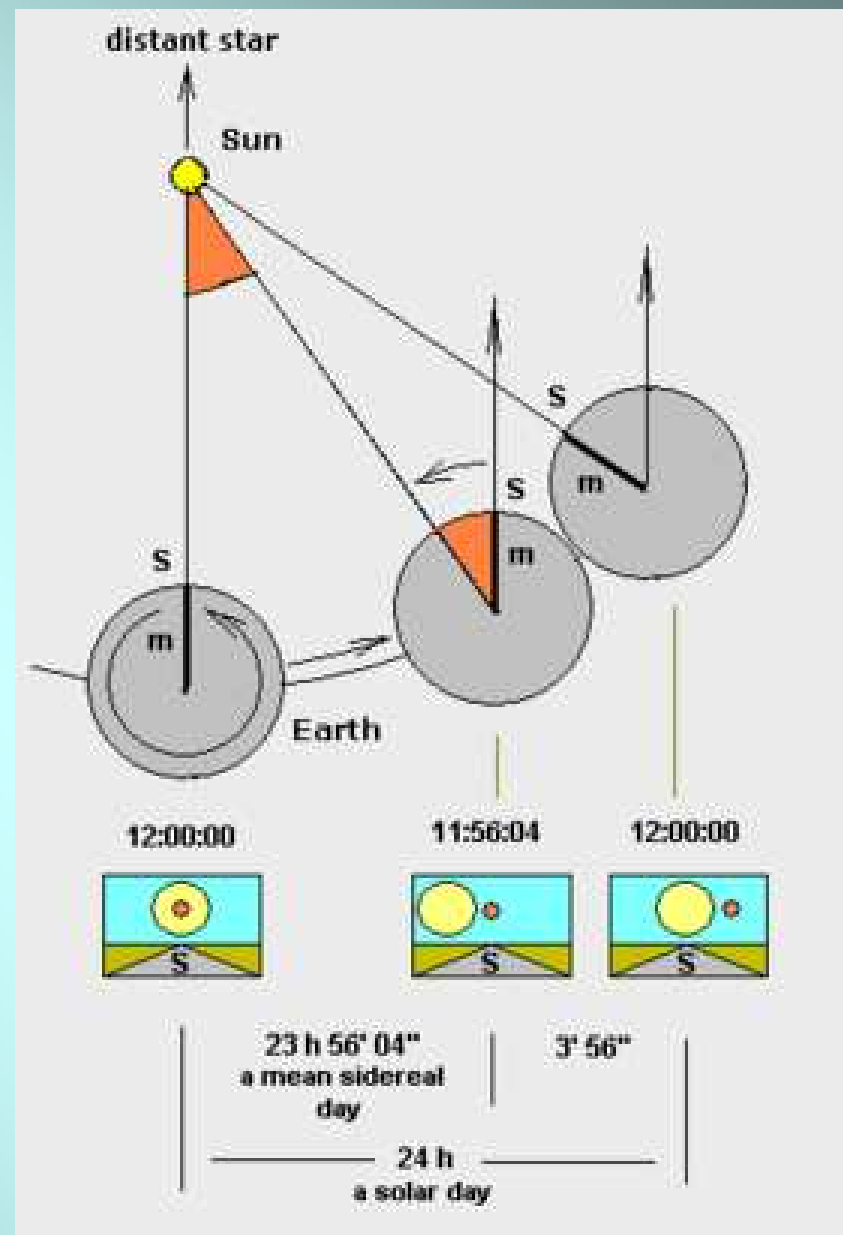


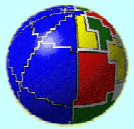


Nel campo HF e VHF il maggior contributo di rumore extraterrestre proviene dalla nostra galassia e raggiunge la massima intensità nel piano della galassia stessa, verso la Via Lattea. Tranne il sole al massimo della sua attività, le sorgenti discrete, come il Cigno o Cassiopea, contribuiscono di meno. Questo significa che tranne in periodi di grande attività solare il rumore radio in questa banda varia in maniera nota con il tempo siderale.

Il tempo siderale è il tempo che la terra impiega per una rotazione completa di 360° ; o, più precisamente, il tempo che impiega una stella per effettuare due transiti successivi sulla verticale.

La differenza tra giorno siderale e giorno solare è di circa 4 minuti e deriva dalla rotazione della terra intorno al sole.





- La misura consiste appunto nel confrontare il rumore ricevuto con una situazione quieta in modo che le variazioni possano essere imputate all'assorbimento ionosferico.
- Si lavora ad una frequenza tra i 30 e i 50 MHz dove gli strati superiori sono piuttosto trasparenti l'eventuale assorbimento è dovuto agli strati inferiori, tra 60 e 110 km.
- Se consideriamo un'antenna il cui lobo principale sia diretto verso l'alto, in un determinato punto ed ad un certo tempo siderale la densità di potenza di rumore cosmico dovrebbe essere costante, in assenza di assorbimento ionosferico
- La potenza in uscita dal ricevitore si può scrivere $P = G (P_s + P_i + P_a + P_r + I)$ dove

P_s = rumore effettivo al ricevitore dal cielo

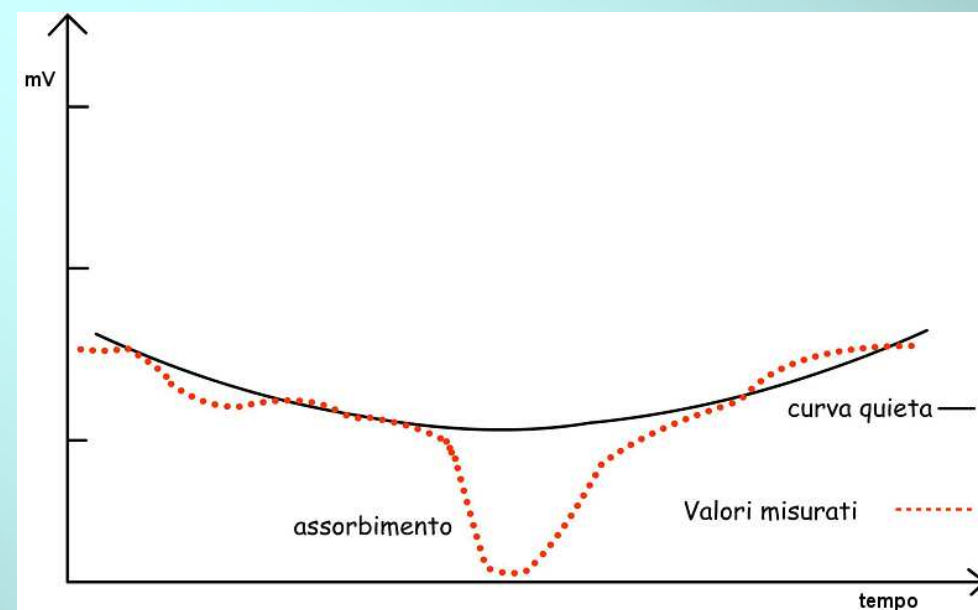
P_i = rumore dalla ionosfera

P_a = rumore ambientale (temperatura),
antenna, cavo

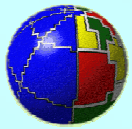
P_r = ricevitore

I = interferenza

G = guadagno del ricevitore



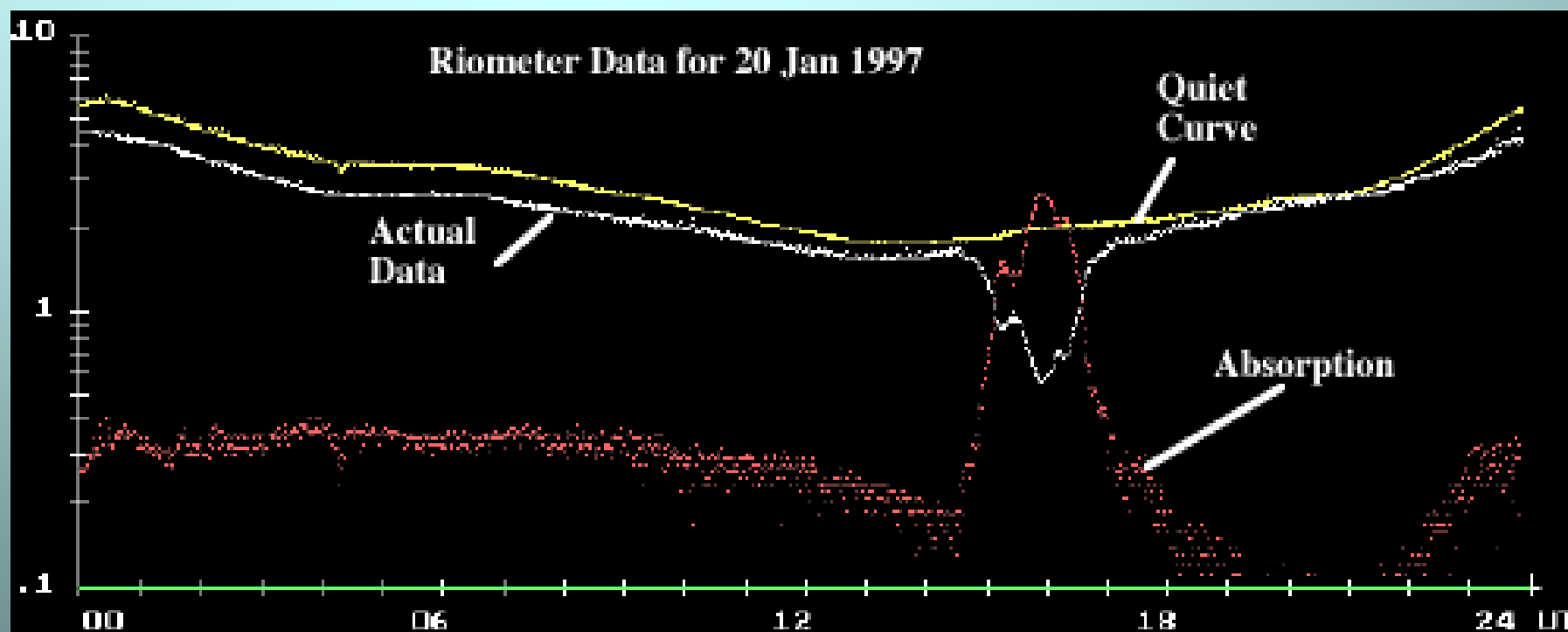
Tensione di uscita in funzione del tempo



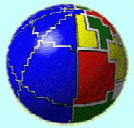
Minimizzando le fonti di rumore indesiderate, il termine che contribuisce di più è il termine di rumore cosmico P_s
 $P \approx P_s$.

L'assorbimento ionosferico è calcolato in dB secondo la semplice relazione

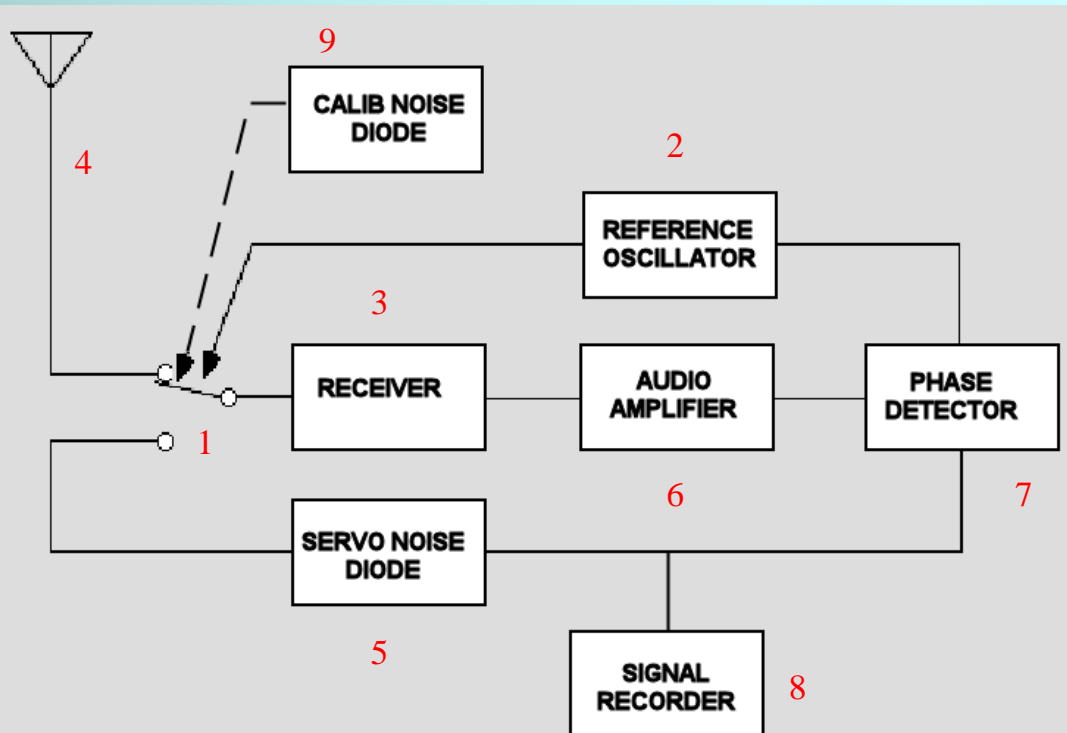
$A = 10 \log (P_0 / P)$ dove P_0 è il rumore cosmico in assenza di disturbo (curva quieta)
 P è il valore realmente misurato



L'immagine mostra l'assorbimento ionosferico a 30 MHz a Gakona, in Alaska. Sono mostrate la curva quieta, in giallo, e la misura in bianco. Si nota come lontano da fenomeni di assorbimento le due curve abbiano lo stesso andamento. Alle 14:30 un disturbo solare ha cominciato ad interagire con la ionosfera terrestre il cui effetto si è protratto fino alle 18:00.

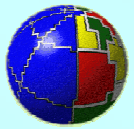


- I primi dispositivi furono messi a punto nel 1952, basati su triodi e diodi a vuoto (valvole termoioniche), seguiti dai modelli a transistor 1966.
- La tecnica base che è qui applicata si basa fundamentalmente sull'amplificatore lock-in.
- Un interruttore a radio frequenza (1) pilotato da un oscillatore (2) connette ad un ricevitore (3) due sorgenti di rumore alternativamente: una sorgente derivante da rumore cosmico (4) ed un generatore di rumore (5) controllato dal sistema. Il ricevitore è seguito da un amplificatore (6) e da un rivelatore di fase (7) che genera un segnale il cui segno dipende da quale delle due sorgenti era maggiore. Tale segnale pilota il generatore di rumore controllato fino ad eguagliare il segnale proveniente dall'antenna.

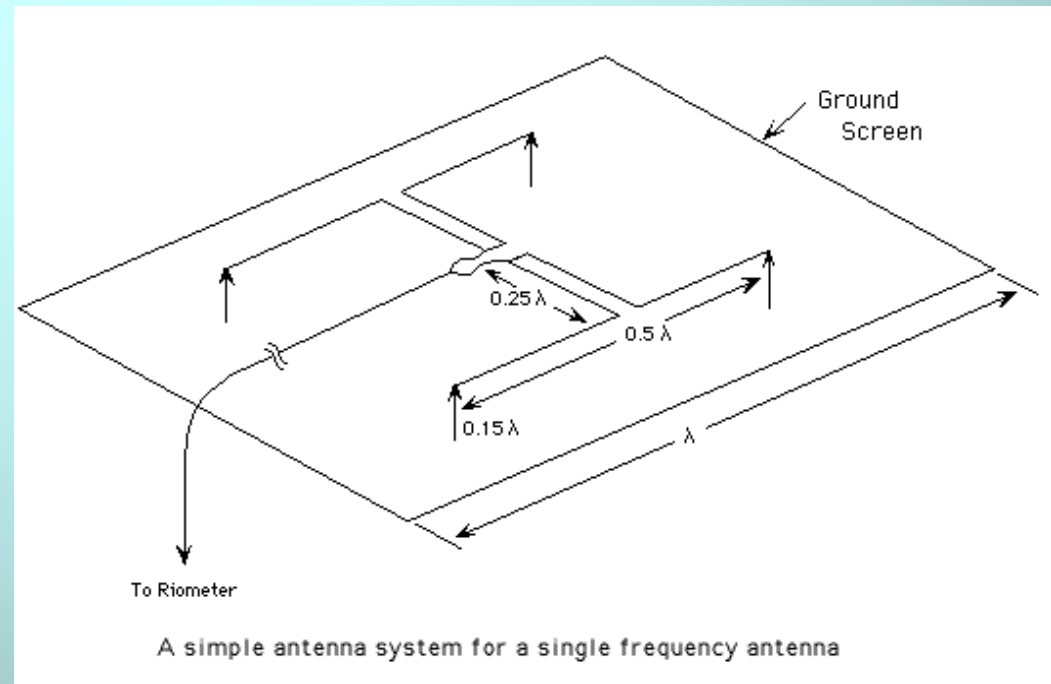


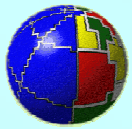
Di fatto il segnale di controllo in tensione, che fuoriesce dal rivelatore di fase è proporzionale al rumore cosmico e viene registrato (8). Una volta ogni ora al posto dell'antenna viene inserito automaticamente un generatore stabile di rumore (9) noto in modo che il sistema si possa calibrare.

Schema a blocchi del riometro base

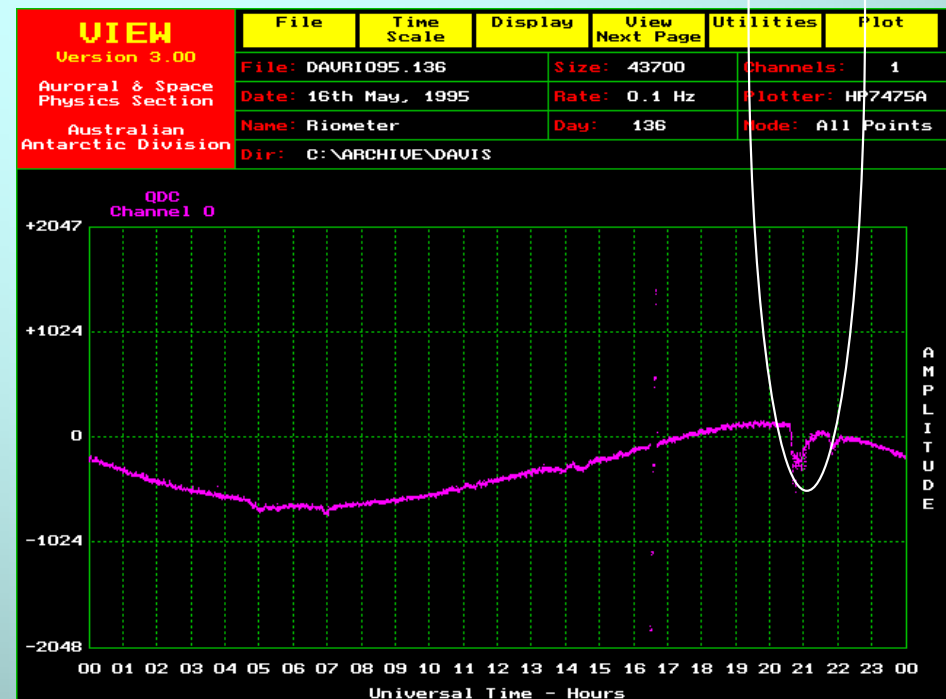
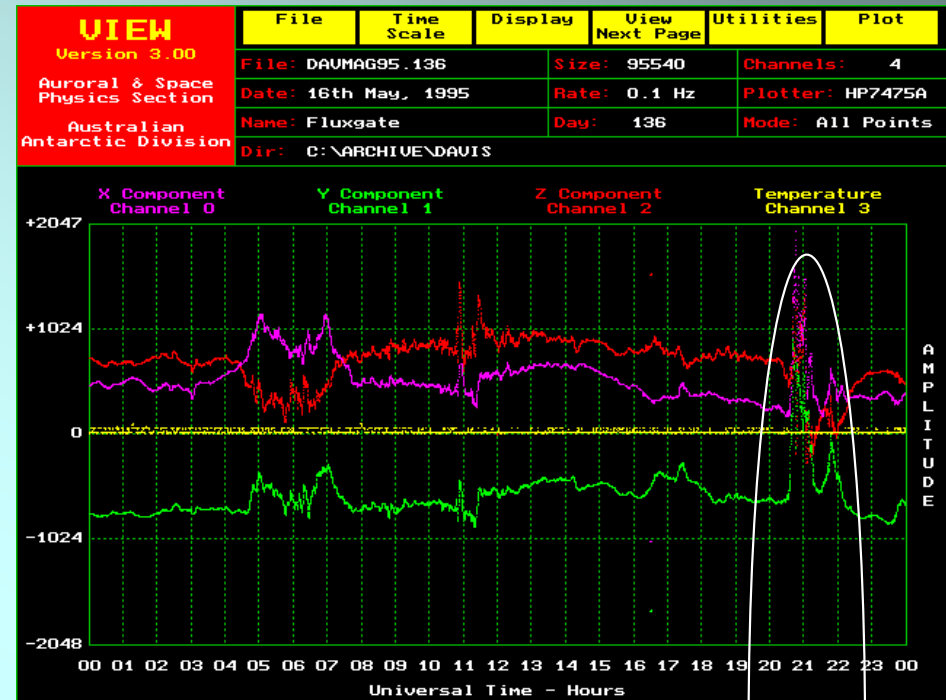


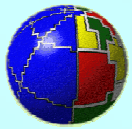
- Nonostante il successo delle varie generazioni di strumenti, la tecnica presenta, in pratica, diversi problemi. In particolare il rumore ionosferico, interferenze radioelettriche artificiali, il rumore del ricevitore ed instabilità del guadagno possono compromettere la misura.
- Un altro importante aspetto è l'ampiezza del fascio dell'antenna che essendo un dipolo non è molto stretto (60°). Questo fa sì che ciò che veramente si misura non è proprio allo zenit, ma in una zona molto più vasta.
- Un altro problema importante è la determinazione della cosiddetta “curva di giorno quieto”. Tale curva rappresenta la variazione di potenza di rumore cosmico in un dato punto come funzione del tempo siderale in assenza di assorbimento ionosferico anomalo.
- Dal momento che in generale i fenomeni di assorbimento durano un tempo limitato si può ricavare la curva quieta analizzando i precedenti 15 giorni siderali e, attraverso operazioni di medie, ricavare una curva quieta di riferimento. O ci si riferisce a misure fatte già da altri in quel posto e periodo.



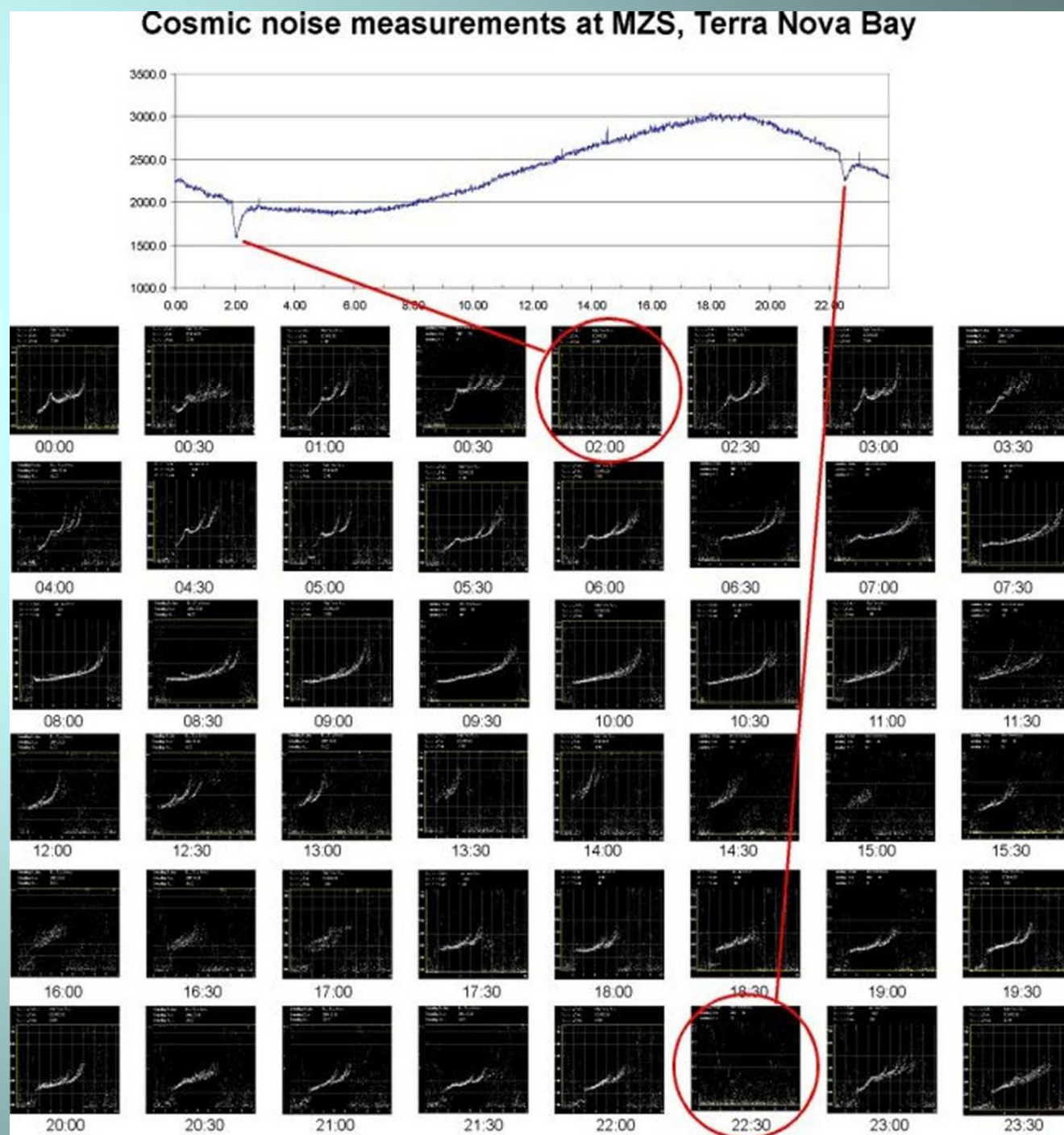


- Il riometro rappresenta il complemento per altri strumenti a terra come radar e magnetometri consentendoci di studiare la ionosfera e le interazioni terra sole.
- Per l'appunto sono mostrati gli andamenti delle componenti X,Y,Z di un magnetometro (in alto) ed il segnale proveniente da un riometro posto nei paraggi. Entrambi evidenziano un andamento anomalo intorno alle 21 indice forse di un fenomeno ionosferico.





- La figura mostra misure contemporanee da altri due strumenti: il riometro in alto e la ionosonda in basso. I due strumenti sono posti nello stesso sito (base italiana in Antartide) ed hanno rilevato i due fenomeni di assorbimento evidenziati con i cerchi rossi.

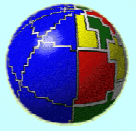


Vantaggi

- In linea di principio è un sistema molto semplice ed economico.
- Riesce a fare misure quando gli altri strumenti non possono (assorbimenti ionosferici, tempeste magnetiche).

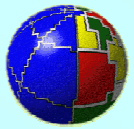
Svantaggi

- Molto sensibile a rumori che non sono quelli da misurare.
- Spesso l'installazione è critica (ad alte latitudini, zone remote).
- Nella sua configurazione più semplice la direzionalità dell'antenna è bassa.

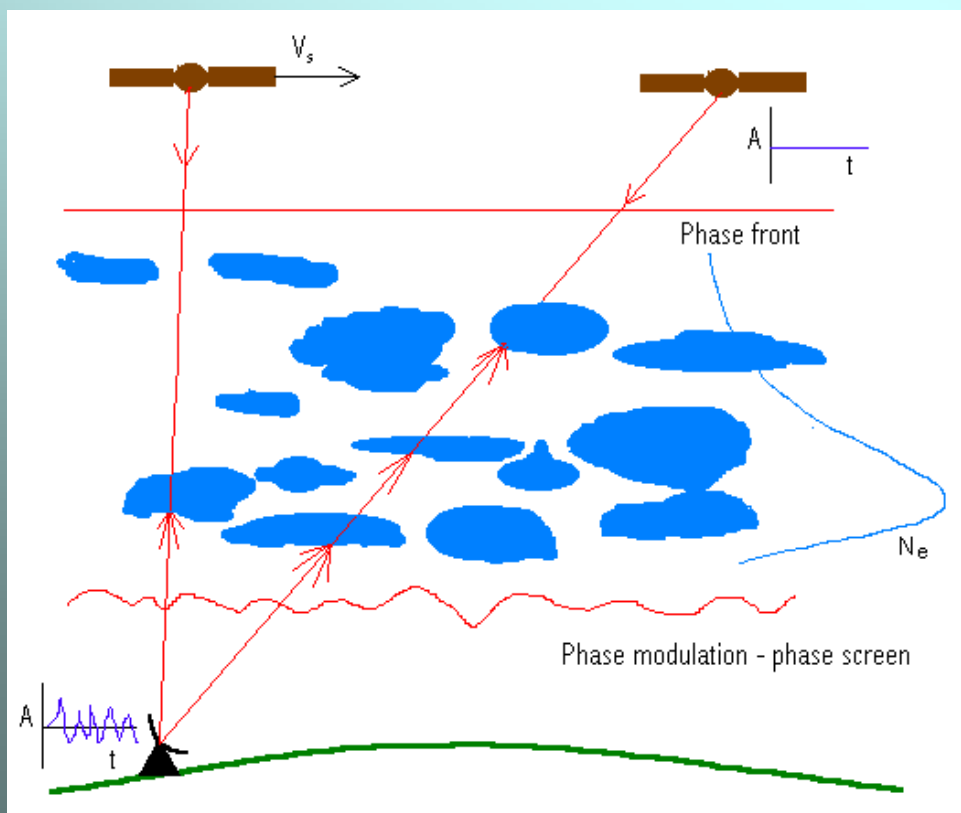


INGV

GPS per scintillazioni



- Le irregolarità della densità elettronica nella ionosfera possono causare la diffrazione dei segnali radio trans-ionosferici provenienti, ad esempio, dai satelliti, GPS incluso.
- I segnali giungeranno a terra attenuati, sfasati come se provenissero da differenti direzioni
- In ricezione si hanno, conseguentemente, delle **fluttuazioni temporali del segnale** sia in ampiezza che in fase: questo fenomeno viene chiamato **scintillazione**.



- L'idea è quella di valutare la geometria e la dinamica delle irregolarità ionosferiche attraverso l'effetto su ampiezza e fase di segnali da satellite.
- Le irregolarità ionosferiche sono oggetto di studio sia da un punto di vista scientifico che pratico, dal momento che influenzano grandemente la validità delle informazioni che giungono al ricevitore.
- Tale fenomeno è particolarmente diffuso in zone polari ed equatoriali.

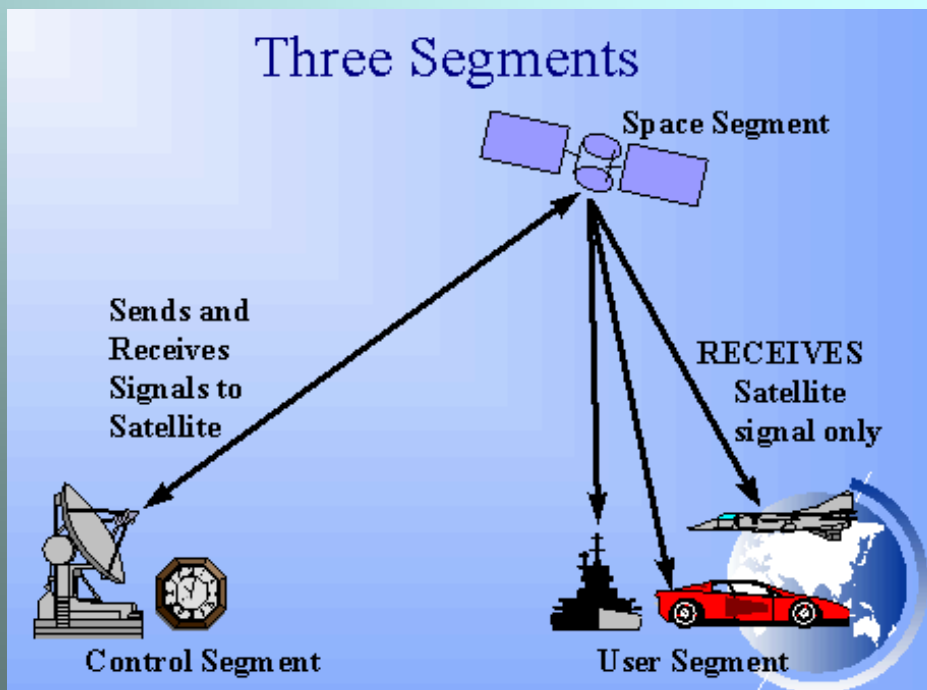
Come misurare le irregolarità?

- Nel passato appositi satelliti furono progettati e lanciati per emettere segnali noti con cui studiare le scintillazioni.
- Di recente si è cominciato ad usare satelliti in orbita già per altri motivi (GPS) per studiare il fenomeno delle scintillazioni.
- Lo studio tuttavia non è ancora del tutto uscito dalla fase sperimentale perché servono dei ricevitori GPS opportunamente modificati per la misura delle scintillazioni.

Perché proprio il GPS?

- I segnali GPS sono sempre disponibili in qualunque momento del giorno ed in qualunque punto della terra.
- Consentono di misurare il comportamento di diversi punti della ionosfera contemporaneamente (diversi satelliti insieme).

- GPS (Global Positioning System).
- È un sistema di navigazione satellitare in grado di fornire in ogni condizione meteorologica e 24 ore al giorno informazioni su posizione, velocità di spostamento e tempo a ricevitori opportuni.
- Sistema militare progettato in maniera robusta ed affidabile.
- Consente una precisione nel posizionamento da qualche cm a diverse decine di metri dipendendo ciò da molti fattori.

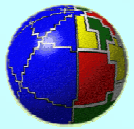


- Il sistema opera a tre livelli (segments):

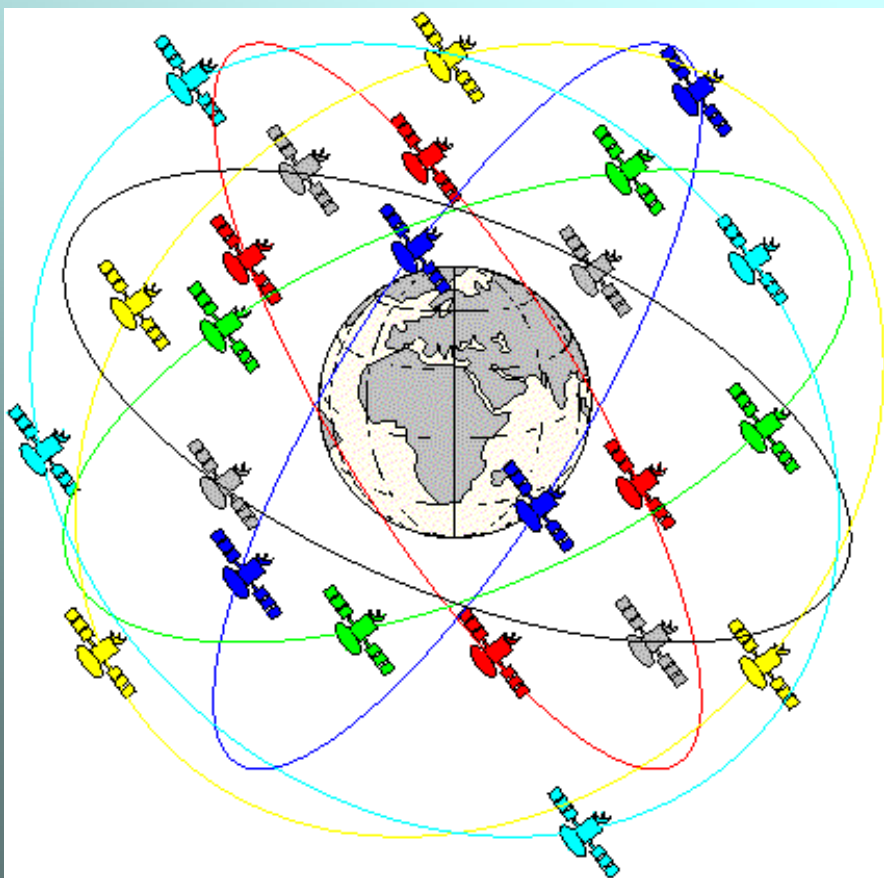
SPACE segment

CONTROL segment

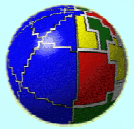
USER segment



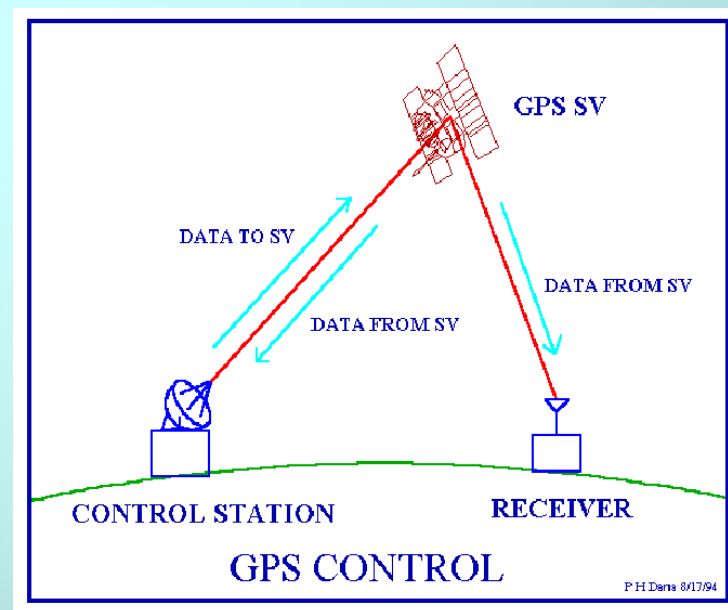
- GPS si basa su 24 satelliti ruotanti su 6 orbite attorno al nostro pianeta.
- Il periodo di ciascun satellite è di circa 12 ore ad una altezza di ≈ 20000 km.
- Questo consente in ogni istante la visione di almeno 6 satelliti contemporaneamente da ogni punto della terra.

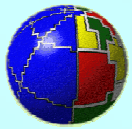


- Ogni satellite è perfettamente identificabile e trasmette posizione, tempo e parametri dell'orbita.
- Due frequenze usate: L1 (1575.42MHz) e L2 (1227.60MHz).
- Queste due frequenze vengono modulate con due codici diversi: il C/A per scopi civili in chiaro, e il P (precision) criptato per scopi militari e per utenti autorizzati.
- In particolare L1 è codificata con entrambi i codici, mentre L2 è modulata solo con il codice P.

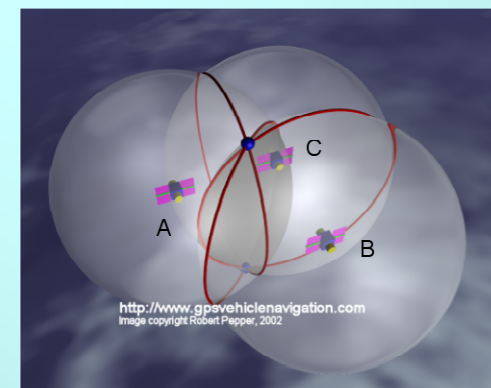
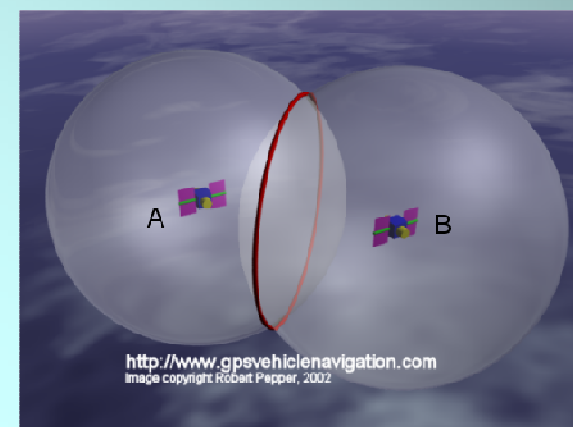
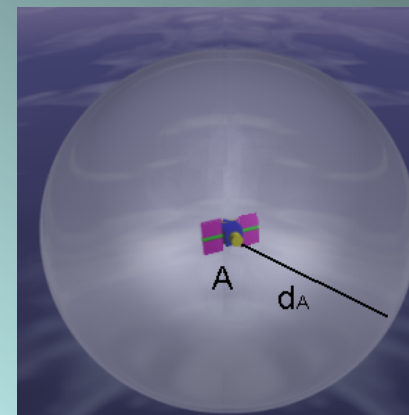


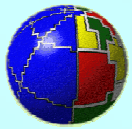
- Il CONTROL segment consiste in 5 stazioni base, di cui una master, per il dialogo con i satelliti sparse per tutto il globo.
- Le stazioni base seguono e tengono sotto controllo i satelliti utilizzando i loro segnali radio che contengono i dati orbitali, informazioni sul clock.
- Le informazioni sono passate alla stazione master che calcola le eventuali correzioni (effemeridi) ed aggiornamenti (almanacco) mandando le informazioni alle stazioni per il dialogo con i satelliti che provvedono all'aggiornamento.
- I satelliti poi ritrasmetteranno a terra le informazioni corrette.



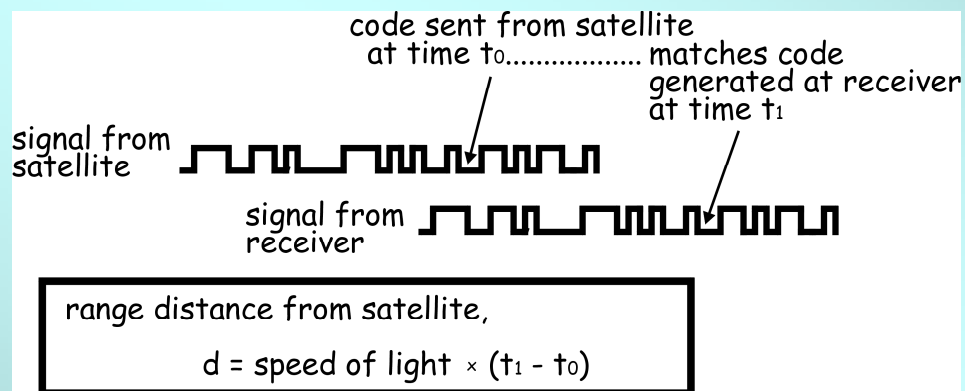


- La triangolazione con più satelliti è la base del metodo con cui il ricevitore GPS stabilisce la sua posizione sulla terra
- Conoscendo la distanza d_A da un solo satellite non è possibile risalire alla posizione del ricevitore
- Con due satelliti la situazione migliora ma ancora c'è incertezza (il cerchio rosso è l'insieme delle soluzioni che soddisfano contemporaneamente i requisiti di distanza da A e da B)
- Con tre satelliti i punti soluzioni possibili del problema si riducono a 2.
- Particolari algoritmi all'interno del ricevitore escludono il punto non corretto (si può usare anche un quarto satellite).

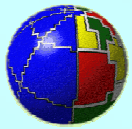




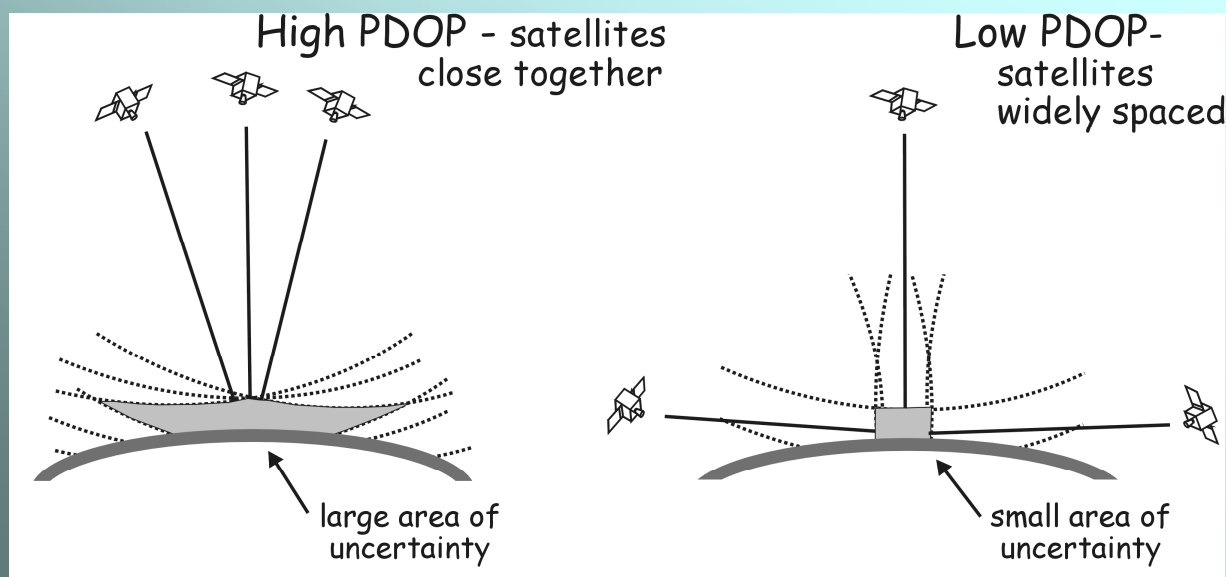
- La distanza tra ciascun satellite ed il ricevitore si ottiene misurando il tempo che la radioonda emessa dal satellite impiega per arrivare al ricevitore.
- Gli orologi del satellite e del ricevitore sono sincronizzati in modo che allo stesso istante di tempo sia il satellite che il nostro ricevitore GPS generano lo stesso codice



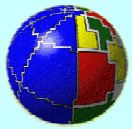
- Confronto i codici tra loro con un'operazione di correlazione (grande immunità al rumore) scoprendo quanto tempo di ritardo c'è.
- È chiaro dunque che la precisione degli orologi del satellite e del ricevitore sono essenziali.
- Satellite ha a bordo un orologio atomico, il ricevitore no ed allora si raggiunge una buona accuratezza con un quarto satellite.
- Naturalmente tutto questo è possibile sapendo dove si trovano i satelliti in ogni istante



- La ionosfera è una zona carica elettricamente che influenza la velocità di propagazione quindi il calcolo della distanza. L'errore che si commette è di $\sim 4\text{m}$.
Si può correggere usando un GPS in cui si misurano le due frequenze sulle quali la ionosfera agisce diversamente per risalire all'effetto ionosferico (vedi TEC).
- Un'altra sorgente di errori è l'atmosfera che dà un contributo all'errore di $\sim 0.7\text{m}$.
Si può correggere con modelli troposferici inseriti nel ricevitore.
- Altra fonte di errori è la precisione del ricevitore (soprattutto il clock) $\sim 2.0\text{m}$.
Si corregge con misure differenziali (2 ricevitori) nelle misure di alta precisione.



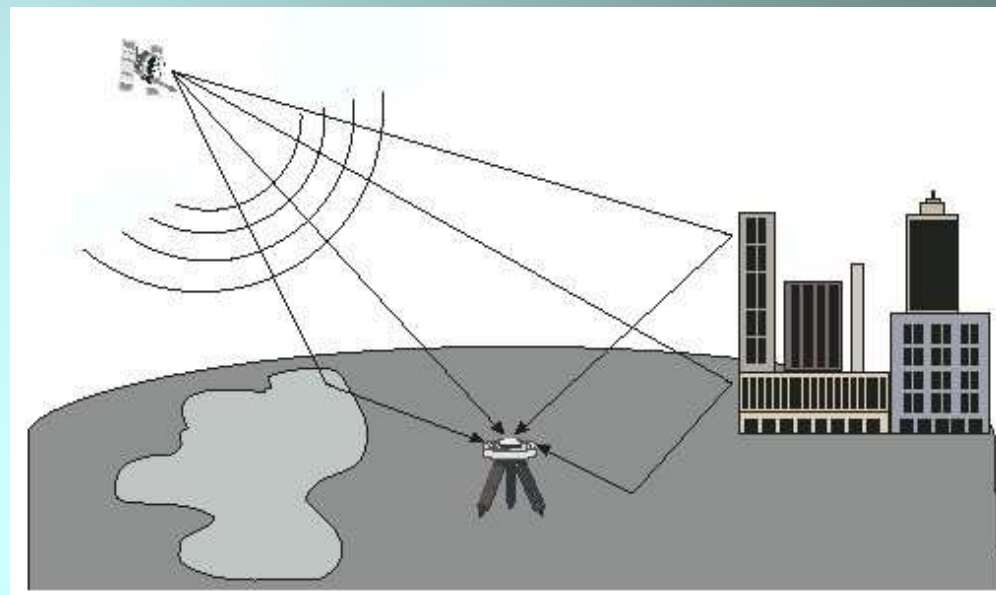
- Non tutte le terne di satelliti sono uguali: Position Dilution Of Precision.
È opportuno scegliere terne di satelliti ben angolati.



Cause di errore

- **Multipath: al ricevitore arriva anche un raggio non diretto, riflesso o rifratto causando un errore fino a 1.4m.**

- Questo comporta che al ricevitore i diversi contributi si compongono secondo ampiezza e fase in modo che il segnale può anche estinguersi.



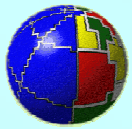
- Se il raggio diretto ha un'ampiezza maggiore di quello di multipath il sistema non si confonde (possibile uso di AGC).
- Se il raggio diretto è fortemente attenuato o addirittura oscurato ed arriva solo il raggio di multipath, si commette un grosso errore.

Il problema si può ridurre:

- a) posizionando l'antenna in un posto ideale (lontano da riflettori) il più in alto possibile
- b) utilizzando magari antenne piatte, meno sensibili a bassi angoli di incidenza, dove è maggiore il contributo del multipath

Quale GPS?

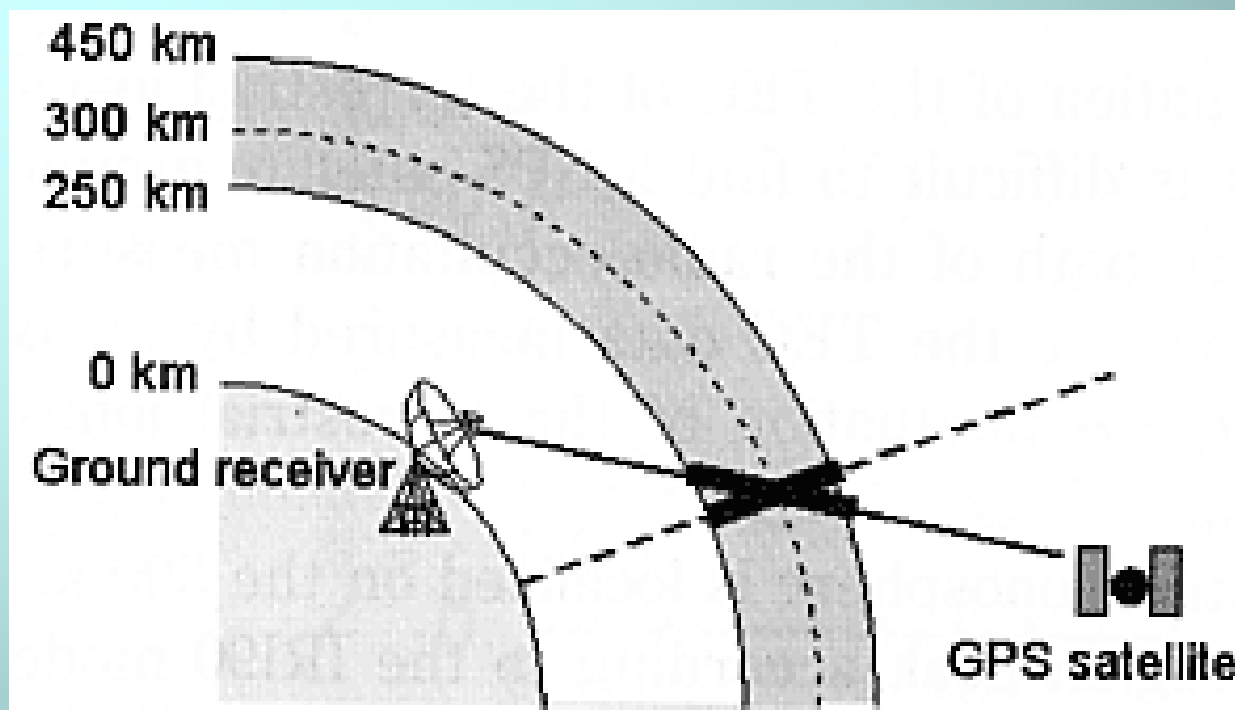
- Vanno usati dei ricevitori per segnale GPS opportunamente modificati o appositamente progettati perché devo misurare ampiezza e fase del segnale L1 e L2 con un'alta frequenza di campionamento.
- Inoltre devo registrare una gran quantità di parametri navigazionali, cioè riguardanti la posizione di ogni satellite visibile al momento.
- I ricevitori GPS per misure di scintillazioni vanno anche installati in maniera opportuna, in modo da avere campo libero intorno e sopra di loro.
- Infatti per fare delle misure significative occorre non incorrere in quelle cause di errore già viste (multipath).
- Le principali misure possibili con un GPS modificato opportunamente sono misure di TEC e di scintillazioni.

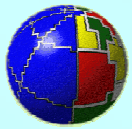


TEC

- La misura di TEC si fa come nel caso dei radio fari, misurando la differenza di fase dei due segnali L1 e L2.
- La misura di TEC dipende dal cammino fatto dal segnale, quindi la misura diretta darebbe il TEC lungo il cammino dal RX al satellite.

In realtà quello che si vorrebbe sapere è il valore del TEC sulla verticale del ricevitore; prendendo la misura diretta si commette un errore (tanto più grande quanto più il satellite è basso sull'orizzonte). Si presenta quindi il problema del passaggio dallo slant TEC (STEC) al vertical TEC (VTEC).





TEC è proporzionale al cammino percorso, per cui il rapporto tra VTEC e STEC è lo stesso che c'è tra AB e AC. In più si assume che N, densità elettronica, dipenda solo dalla quota, quindi nel tratto AB N si comporta come nel tratto CD.

$$DC = AC \cos z'$$

$$\cos z' = \sqrt{1 - (\sin z')^2}$$

appliciamo il teorema dei seni al triangolo OAC

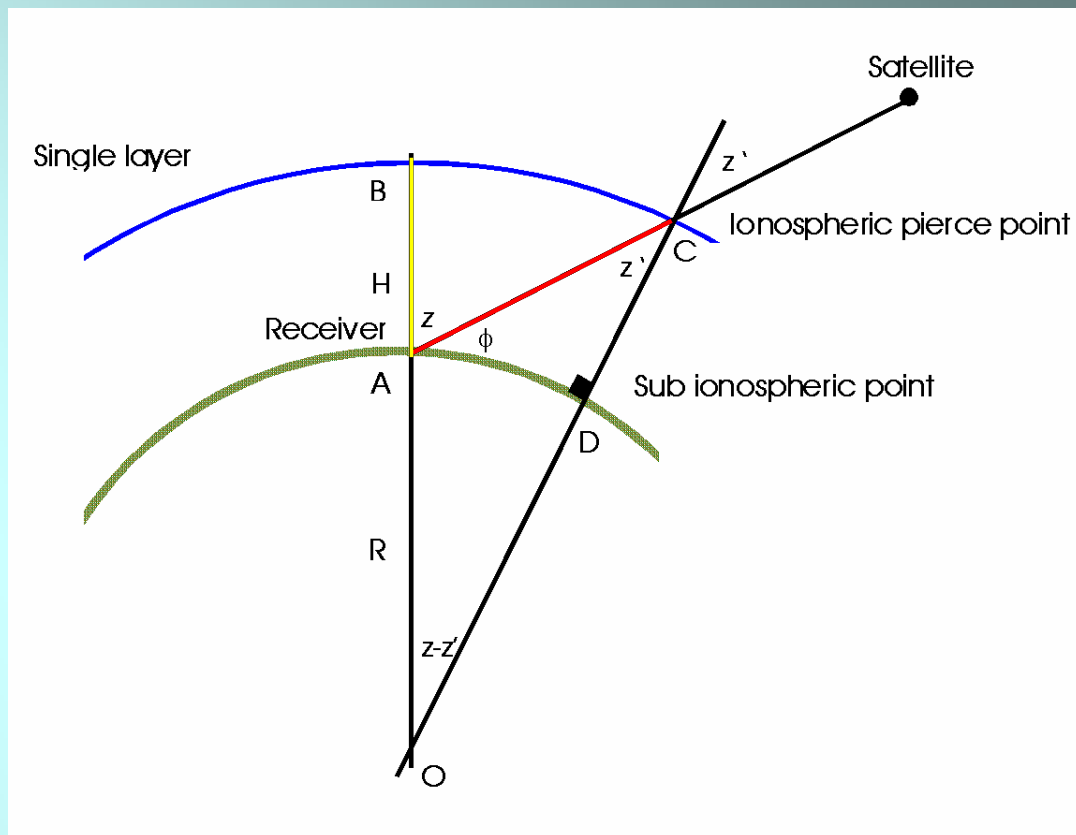
$$\frac{R}{\sin z'} = \frac{R+H}{\sin(\pi - z)}$$

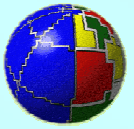
$$\text{da cui} \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \cdot \sin(\pi - z) \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \cdot \cos\left(z - \frac{\pi}{2}\right) \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - z\right)$$

$$\text{ma } \left(\frac{\pi}{2} - z\right) = \phi \quad \text{da cui}$$

$$\sin z' = \frac{R}{R+H} \cdot \cos \phi \quad \text{e passando al cos avrò}$$

$$\cos z' = \sqrt{1 - \left(\frac{R}{R+H} \cdot \cos \phi\right)^2}$$





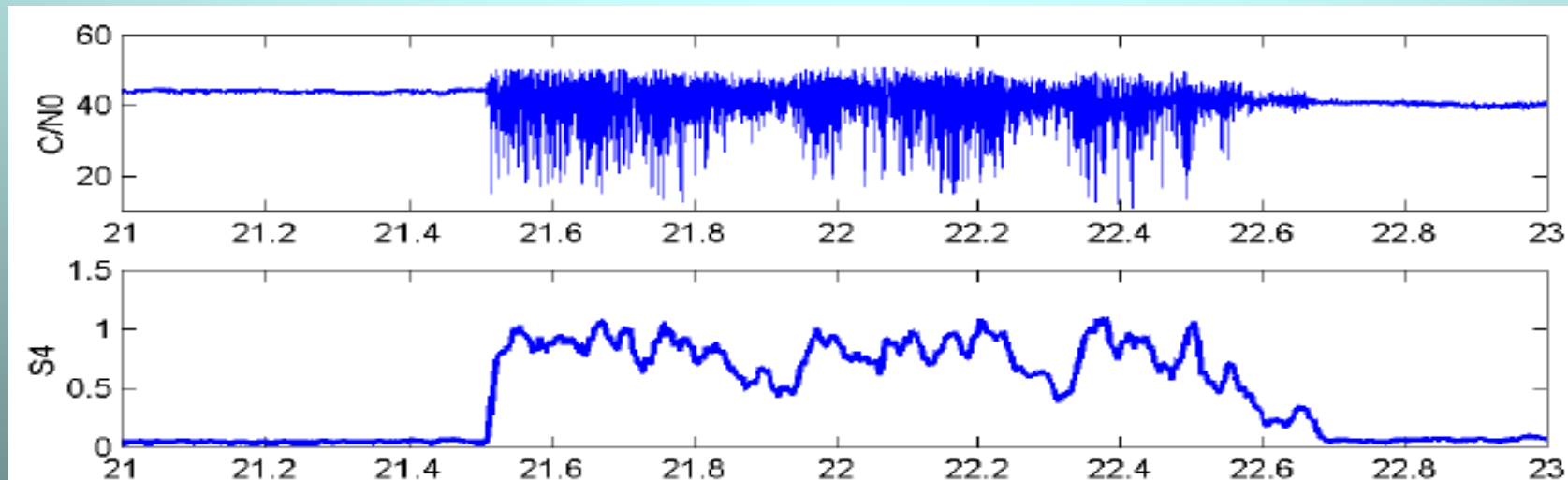
Scintillazioni

- La misura delle scintillazioni viene effettuata monitorando ogni 20ms ampiezza e fase del segnale L1 ricevuto da cui si derivano gli indici S_4 e σ_Φ .

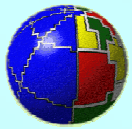
- In particolare
$$S_4 = \sqrt{\frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}}$$
 dove I è l'intensità del segnale.

- Le medie si intendono calcolate su un minuto di dati (quindi su 3000 dati).

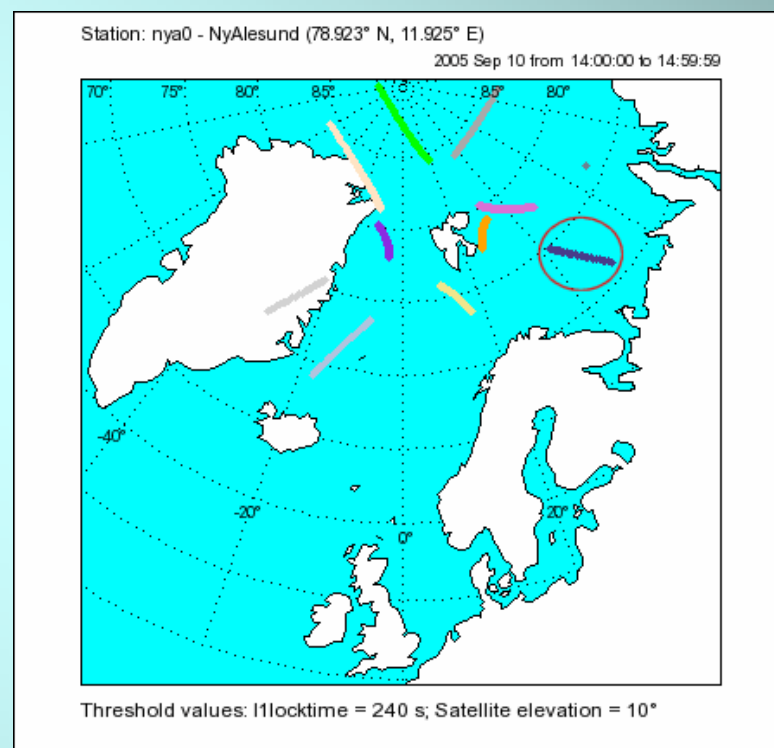
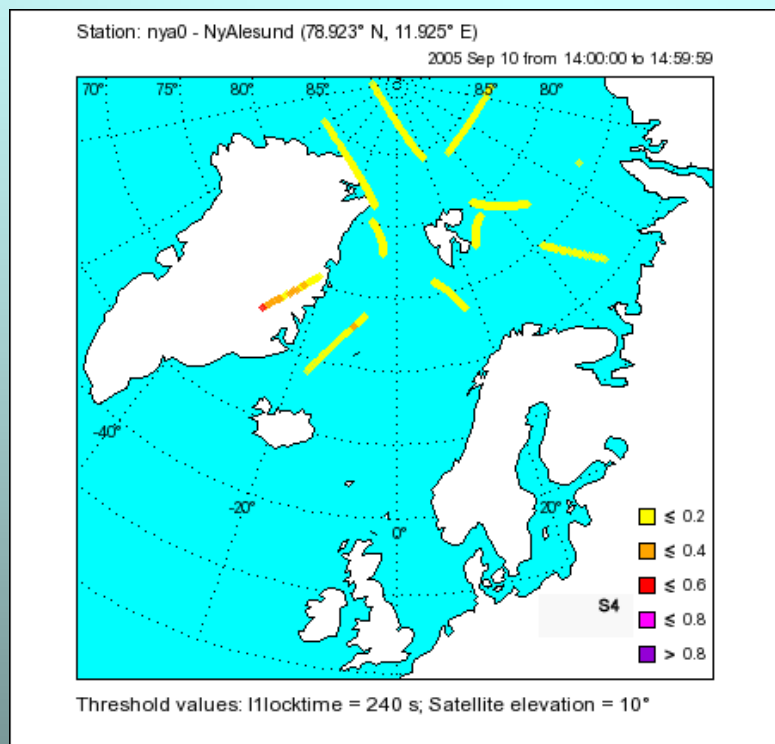
σ_Φ è la deviazione standard dei valori di fase calcolata ogni 15, 30, o 60 secondi.



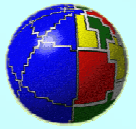
esempio di andamento di S_4 in relazione al comportamento del S/N di L1



Per rappresentare su mappe il muoversi dei satelliti, o meglio delle irregolarità abbiamo bisogno di proiettare la posizione del satellite su una sfera interposta tra il satellite e la terra. Dal momento che lo strato F è il maggior responsabile di variazioni di densità elettronica scegliamo una quota di 300km per proiettare i satelliti. Il punto in cui la congiungente satellite-ricevitore “buca” la superficie ora ora definita, è detto “ionospheric pierce point”



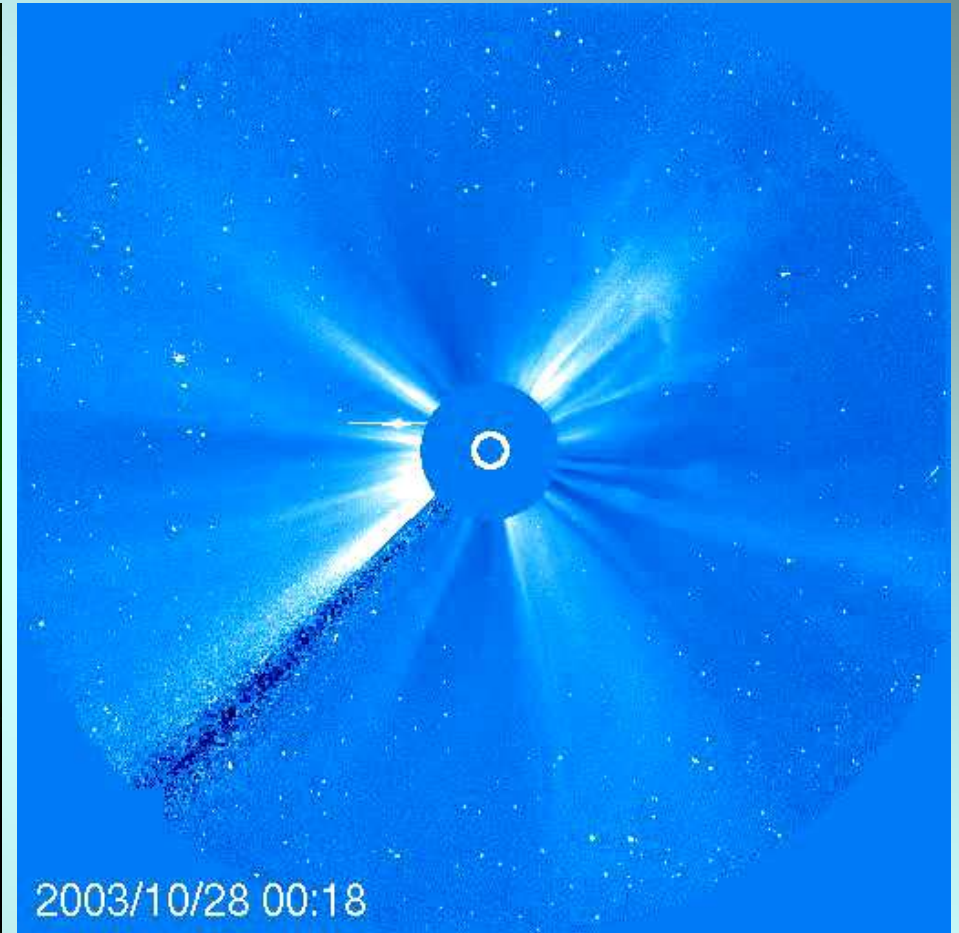
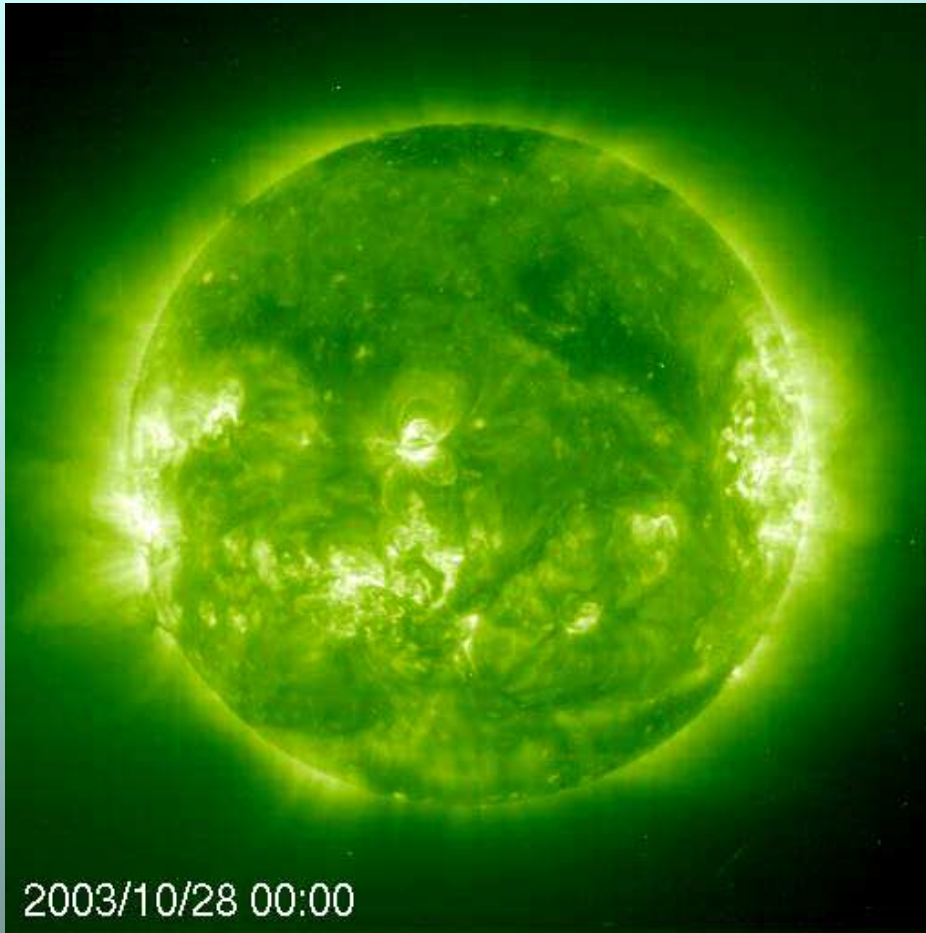
In questo modo le grandezze misurate, TEC ed irregolarità, vengono ad avere delle coordinate "geografiche" sulla sfera a 300 km.



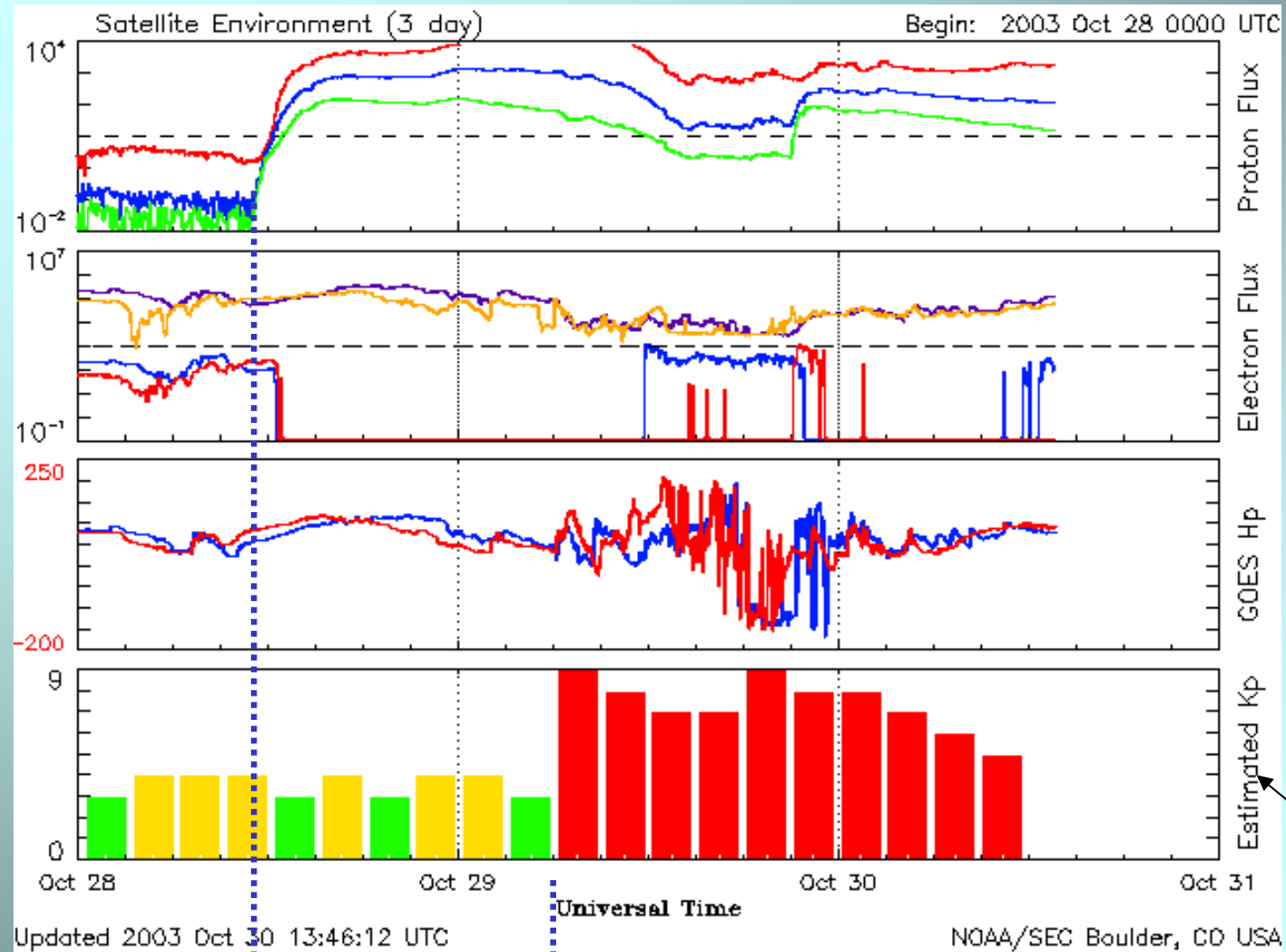
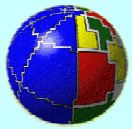
INGV

Scintillazioni 15/18

Episodio di **Coronal Mass Ejection** visto dal satellite SOHO



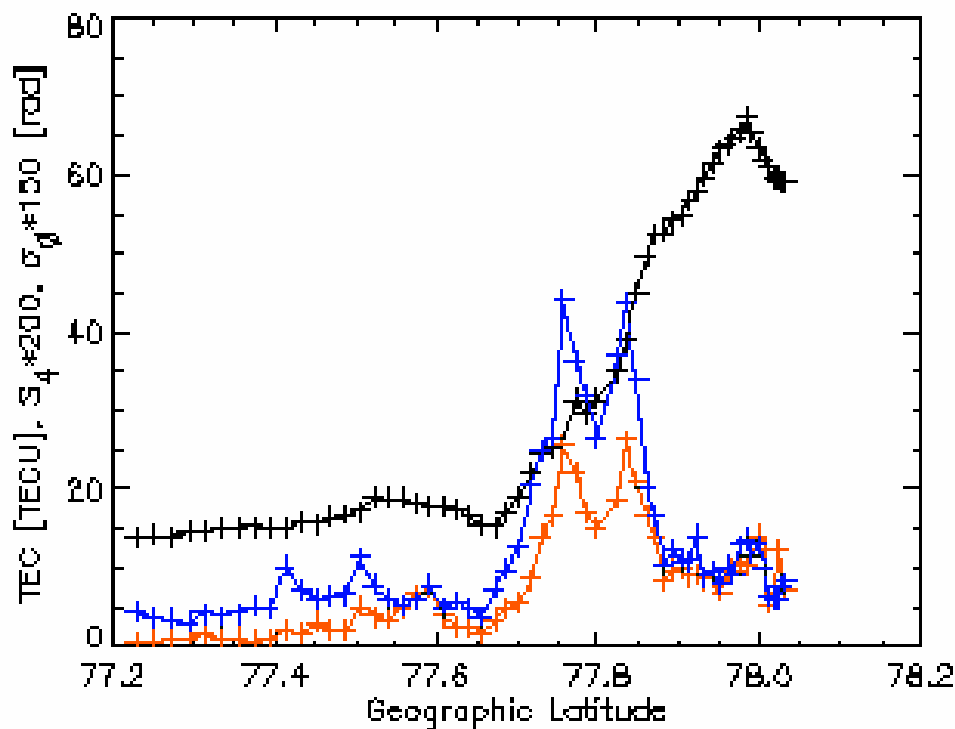
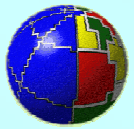
SOHO si muove intorno al sole insieme alla terra (si trova nel punto lagrangiano L1) ad una distanza di 1.5 milioni di km dalla terra e porta degli strumenti che consentono di guardare il sole con varie tecniche.



indice magnetico

inizio fenomeno
28 ottobre 2003

fenomeno interessa la terra
29 ottobre 2003



++++ = VTEC

++++ = Fase (σ_ϕ)

++++ = Ampiezza (S_4)

Quando gli effetti si fanno sentire anche sulla terra le particelle che sono penetrate nella ionosfera creano forti variazioni di TEC localizzate e proprio in coincidenza di tali variazioni s_4 e $\sigma\Phi$ presentano dei picchi.

Vantaggi

- GPS si riceve in qualunque posto della terra in ogni istante.
- Posso avere informazioni su diverse direzioni contemporaneamente.

Svantaggi

- Ricevitori in grado di fare questo tipo di misure sono costosi.
- Analisi dei segnali è complessa.

Bibliografia

- Budden K.G.: 1966, 'Radiowave in the ionosphere', Cambridge Univ. Press UK.
- Davies K.: 1990, 'Ionospheric Radio ', published as IEE Electromagnetic Waves Series No, 31 Peter Peregrinus Ltd London, UK.
- Dominici P: 1971, 'Radiopropagazione ionosferica, Monografie scientifiche e tecniche N.2 del Servizio Ionosferico Nazionale, Istituto Nazionale di Geofisica, Roma.
- Hunsucker R. D., "Radio techniques for probing the terrestrial ionosphere" Springer-Verlag